Antenne SUD
Pist Oasis 3 – Bât A
Rue de la Bergerie
30319 ALES CEDEX
Tél : +33 (0)4.66.61.09.80
Fax : +33 (0)4.66.25.89.68

Bassin de lignite de Provence (13) Révision et mise à jour des aléas liés à l'ancienne activité minière Rapport de synthèse

RAPPORT S 2016/004DE - 16PAC22070

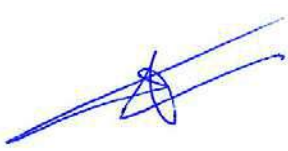
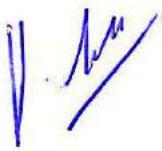
Date : 22/01/2016

Bassin de lignite de Provence (13)
Révision et mise à jour des aléas liés à l'ancienne activité minière
Rapport de synthèse

RAPPORT S 2016/004DE - 16PAC22070

Diffusion :

Pôle Après-Mine Sud	Jehan GIROUD
DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur *20 ex. papier (2 DREAL, 17 communes, 1 DDT)* *21 CD (2 DREAL, 17 communes, 1 DDT, 1 Préfecture)*	Hubert FOMBONNE
GEODERIS	Rafik HADADOU

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	T. DELAUNAY	O. LEFEBVRE	C. VACHETTE
Visa			

SOMMAIRE

1 Définitions et méthodologie 5
1.1 Définitions de l'aléa 5
1.2 Incertitudes cartographiques 5
1.3 Méthodologie mise en œuvre 6
2 Contexte et périmètre de l'étude 9
3 Travaux réalisés et démarche adoptée 11
4 Géologie régionale 15
4.1 Géologie 15
4.2 Hydrogéologie 18
5 Historique de l'exploitation 21
5.1.1 Description des travaux miniers 21
5.1.2 Exploitations artisanales anciennes 22
5.1.3 Exploitation par chambres et piliers abandonnés 23
5.1.4 Exploitations par tailles remblayées 25
5.1.5 Exploitation par longues tailles foudroyées 27
5.1.6 Synthèse 27
6 Etat des connaissances actuelles du bassin 29
6.1 Ouvrages débouchant au jour 29
6.1.1 Les entrées de descenderies 29
6.1.2 Les entrées de galeries 29
6.1.3 Les puits 30
6.2 Les dépôts : Verses et terrils 30
6.3 Les mouvements de terrain 32
6.4 L'activité sismique 33
6.5 Gaz de Mine 34
6.5.1 Généralités 34
6.6 Les échauffements 36
6.7 Gestion des eaux et aux impacts environnementaux 36
6.7.1 Aspects quantitatifs 36
6.7.2 Aspects qualitatifs 38
7 Cartographie informative 39
7.1 Supports cartographiques 39
7.2 Incertitudes de localisation 39
7.2.1 Incertitudes sur la position des éléments de surface 40
7.2.2 Incertitudes de localisation des travaux miniers souterrains 40
7.3 Système d'information géographique 41
8 Liste des phénomènes 45
9 Nature des aléas résiduels retenus 47

10 Evaluation des aléas mouvements de terrain 49
10.1 L'effondrement localisé 51
10.1.1 Description du phénomène 51
10.1.2 Zone d'altération superficielle 52
10.1.3 Rappel des conclusions de l'étude préliminaire sur l'aléa effondrement localisé 53
10.1.4 *Apport des informations complémentaires et conclusion sur l'aléa effondrement localisé* 55
10.2 L'affaissement 61
10.2.1 Description du phénomène 61
10.2.2 Rappel des conclusions de l'étude préliminaire sur l'aléa affaissement 62
10.2.3 Apport des informations complémentaires et conclusion sur l'aléa affaissement 62
10.3 Le glissement 65
10.3.1 *Description du phénomène* 65
10.3.2 *Rappel des conclusions de l'étude préliminaire sur l'aléa glissement* 65
10.3.3 *Apport des informations complémentaires et conclusion sur l'aléa glissement* 67
10.4 Le tassement 67
11 Evaluation de l'aléa échauffement 69
12 Evaluation de l'aléa inondation 71
12.1.1 Description des phénomènes 71
12*.1.2 Rappel des conclusions de l'étude préliminaire sur l'aléa inondation* 71
12.1.3 Synthèse de l'aléa inondation 71
13 Cartographie des aléas 77
13.1 Cartographie de l'aléa effondrement localisé 77
13.2 Cartographie de l'aléa affaissement 80
13.3 Cartographie de l'aléa glissement 82
13.4 Cartographie de l'aléa tassement 83
13.5 Cartographie de l'aléa échauffement 83
13.6 Cartographie de l'aléa inondation 83
14 Conclusions 85

Mots clés : **Allauch, Belcodène, Bouc-Bel-Air, La Bouilladisse, Cadolive, La Destrouuse, Fuveau, Gardanne, Greasque, Marseille, Meyreuil, Minet, Peynier, Peypin, Rousset, Siminane-Collongue, Saint-Savournin, Septème-les-Vallons, Trets, effondrement localisé, affaissement, glissement superficiel, tassement, échauffement, inondation, lignite**

Introduction

Le bassin de lignite de Provence se situe entre Aix-en-Provence et Marseille. Il s'étend sur 70 km d'Est en Ouest, depuis Saint-Maximin jusqu'à l'étang de Berre et présente une largeur maximale de 12 km entre Aix et Marignane.

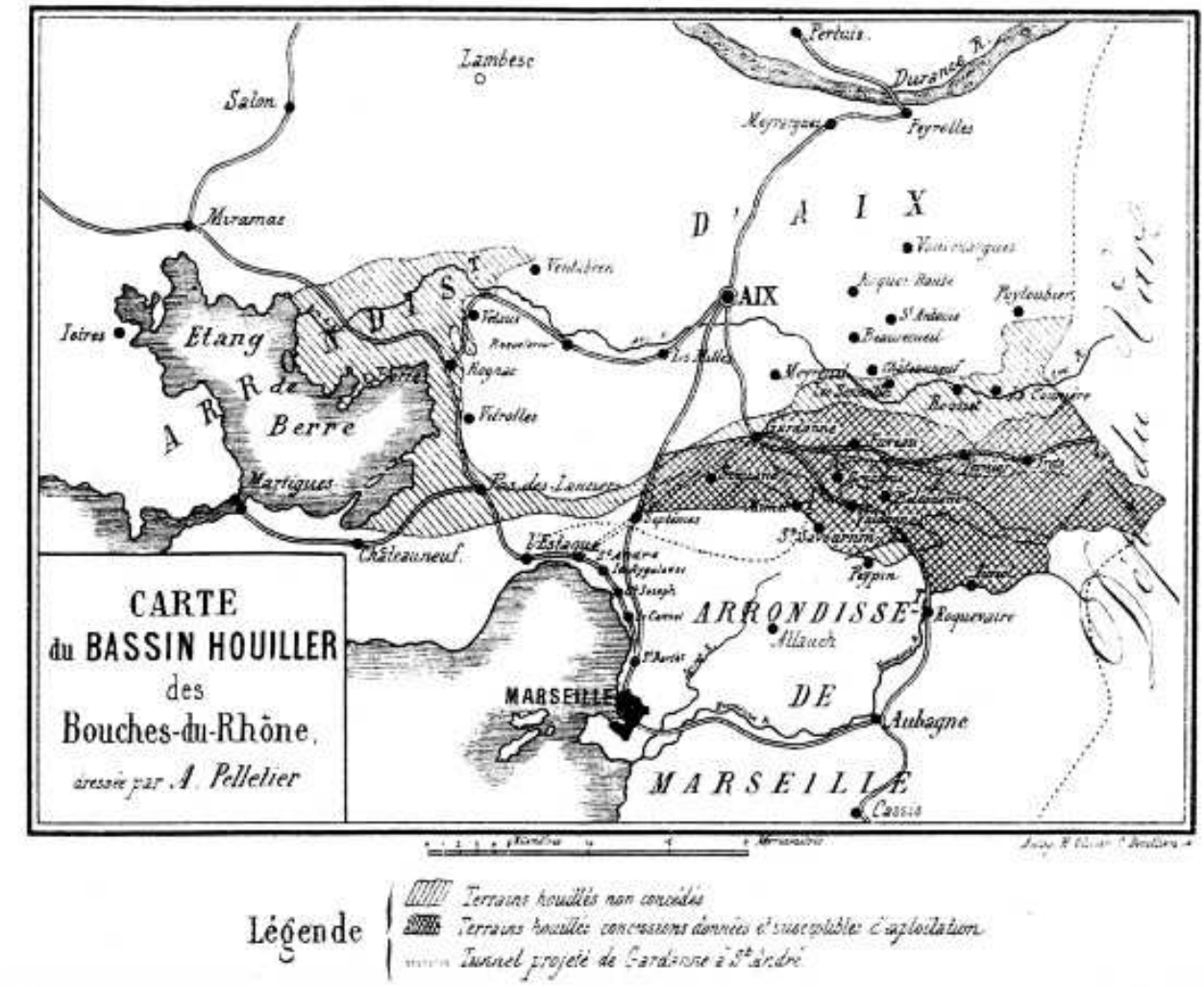


Figure 1 : Bassin Houiller des Bouches-du-Rhône (source DADT)

Suite au dépôt par CdF du dossier d'arrêt définitif des 12 concessions couvrant la majeure partie de l'exploitation du Bassin de Provence, Geoderis a réalisé en 2003, à la demande de la DRIRE (aujourd'hui DREAL) de Provence Alpes Côte d'Azur, l'expertise du dossier avec le concours d'experts nationaux et internationaux (cf.[4][1]). Les principales conclusions de cette expertise portant sur les mouvements de terrain retiennent une instabilité potentielle des travaux souterrains en particulier, la possibilité d'apparition, sous certaines configurations d'exploitation, de phénomène d'effondrement localisé ou d'affaissement.

Ces éléments ont conduit, la DRIRE Provence Alpes Côte d'Azur, à confier à Geoderis en 2006, l'évaluation des aléas miniers résiduels. Une étude préliminaire des aléas a été produite en 2009 (cf. [1]). A ce stade, le travail a été réalisé à l'échelle du bassin minier uniquement selon les éléments informatifs et les données issus des dossiers de CdF.

[1] *Référence en fin de rapport au chapitre bibliographie*

Dans une deuxième phase, la DREAL Provence Alpes Côte d'Azur, a demandé en 2012 à Geoderis de réaliser l'étude détaillée des aléas. L'objectif d'une étude détaillée des aléas est d'établir, à partir de la synthèse documentaire des données et des fonds cartographiques sources disponibles sur les sites minier concernés et à l'échelle des communes, les cartes informatives et des aléas liés à ces anciennes exploitations. Pour le rendu final de ces cartes, les fonds topographiques ou photographiques géoréférencés utilisés sont les fonds IGN dont le Scan 25® IGN et la BD Ortho® IGN (prise de vue de 2011).

Pour ce faire, un important travail de collecte d'informations, d'analyse précise des plans miniers sources (méthodes, dimensions et profondeurs d'exploitation par couche), de la géologie du recouvrement (nature des roches, failles) a été engagé. En parallèle, une réflexion a été menée, avec le concours d'experts nationaux, sur les mécanismes et phénomènes de mouvements de terrain rencontrés, et en particulier l'affaissement.

Ces travaux permettent à ce jour d'aboutir à un affinage de la cartographie des aléas par commune concernée sur l'ensemble du bassin.

Ce rapport présente la synthèse des éléments informatifs et des conclusions sur l'évaluation et la cartographie des aléas retenus.

1 DEFINITIONS ET METHODOLOGIE

1.1 Définitions de l'aléa

L'**aléa** est un concept qui correspond à l'éventualité qu'un phénomène d'intensité qualifiable ou quantifiable, se produise sur un site donné. Dans le domaine du risque minier comme dans celui du risque naturel, l'aléa résulte du croisement de l'intensité d'un phénomène redouté et de l'éventualité de sa survenance (cf. figure 2).

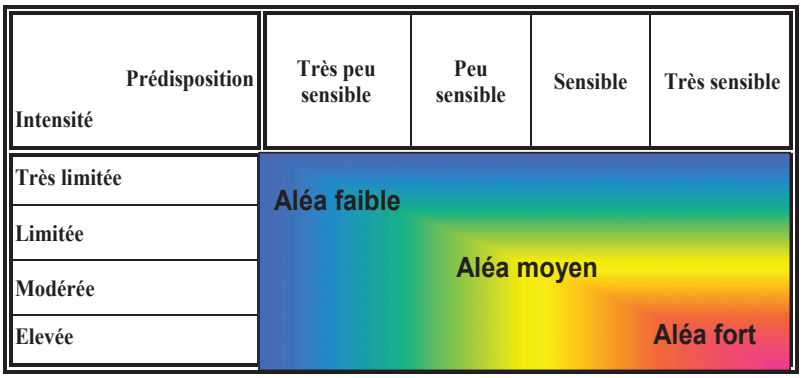


Figure 2 : Grille de croisement intensité /Prédisposition (d'après [1])

L'aléa est hiérarchisé. On utilise les termes « **aléa fort** », « **aléa moyen** » et « **aléa faible** ». Cette hiérarchisation peut signifier :

- que les zones concernées par l' « aléa fort » sont davantage prédisposées à l'apparition de dégradations en surface que les zones d'« aléa moyen » ou d'« aléa faible » ;

  et/ou,

- que les phénomènes susceptibles de se produire dans les zones d' « aléa fort » sont d'un niveau plus élevé que dans les zones d' « aléa moyen » ou d' « aléa faible ».

1.2 Incertitudes cartographiques

La première étape de l'étude d'aléa, appelée « phase informative » consiste entre autre, à positionner sur fond cartographique, les anciens travaux et autres éléments utiles (ouvrages débouchant au jour, indices de désordres, dépôts de surface) dans leur environnement.

Le positionnement des travaux miniers, des ouvrages et désordres qui n'ont pas été retrouvés sur le terrain est affecté d'une incertitude globale pouvant être décomposée de la manière suivante :

- Incertitude de localisation de l'ouvrage minier : elle dépend des éléments ayant mené à son positionnement. Si les ouvrages relevés sur le terrain au DGPS se voient attribuer une très faible incertitude (de quelques décimètres à quelques mètres), ceux dont la position est tirée d'anciens plans portant peu de points de repère se voient attribuer l'incertitude de ces plans.

- Incertitude liée à la reproduction du plan : par exemple, photographier un plan provoquera une incertitude plus grande que de le scanner.
- Incertitude liée à l'opération de géoréférencement du plan : elle dépend principalement de l'incertitude des points de repère utilisés pour son calage.
- Incertitude liée au choix du support cartographique : le support cartographique, la BD Ortho® de l'IGN dans le cas présent, de par sa précision est lui-même facteur d'une erreur de positionnement indépendante des ouvrages miniers. Elle est estimée à 3 m pour la BD Ortho® de l'IGN.

Ces incertitudes n'apparaissent pas en cartographie de phase informative, mais sont incluses dans les **marges** prises en compte pour la cartographie des aléas. En effet, la cartographie de l'aléa lié à un élément minier intègre l'extension du phénomène ainsi que l'incertitude globale décomposée ci-dessus.

1.3 Méthodologie mise en œuvre

Les différentes investigations ont été réalisées dans le cadre méthodologique retenu pour les études des anciens sites miniers, conformément aux textes réglementaires. Le déroulement de l'étude des aléas s'appuie donc sur la démarche établie dans le guide méthodologique d'élaboration des plans de prévention des risques miniers (cf. [4]). Il est rappelé que la réalisation d'une étude des aléas comprend deux phases successives, qui se traduisent chacune par un ou plusieurs documents cartographiques :

- **Une phase informative**, présente la synthèse des données minières, le repositionnement des travaux dans leur environnement et les éléments utiles et nécessaires à l'évaluation des aléas résiduels (géologie, hydrogéologie, indices de désordres…), l'ensemble s'appuyant sur une enquête de terrain. Le produit de cette phase est une **carte informative**, positionnant les différents éléments sur la BD Ortho® de l'IGN.

- **Une phase d'évaluation et de cartographie de l'aléa**. Sur la base des données acquises lors de la phase informative, les différents phénomènes potentiellement envisageables, compte tenu de la nature des travaux, sont étudiés et évalués à la lumière des paramètres spécifiques au site. Enfin, l'enveloppe des zones affectées par les différents aléas est reportée sur fond cartographique.

PHASE INFORMATIVE

2 CONTEXTE ET PERIMETRE DE L'ETUDE

Le bassin de lignite de Provence a été l'objet dès le milieu du XV^{ème} siècle d'autorisations de recherche pour la « pierre à charbon ». Après plusieurs siècles d'exploitation plus ou moins intensive, la fermeture de Charbonnages de France, devenus titulaires de 16 titres couvrant l'essentiel du bassin, sera prononcée en 2003. C'est le contour de ces 16 titres qui a guidé le périmètre de l'étude des aléas (cf. figure 3).

Les communes concernées par les titres miniers, au nombre de 17, sont ainsi les suivantes :

- Allauch
- Belcodène,
- Bouc-Bel-Air,
- Cadolive,
- Fuveau,
- Gardanne,
- Gréasque,
- La Bouilladisse,
- La Destrousse,
- Meyreuil,
- Mimet,
- Peynier,
- Peypin,
- Rousset,
- Simiane-Collongue,
- Saint-Savournin,
- Trets.

Pour ces communes, tous les travaux miniers ont été étudiés. A signaler que la galerie de la mer, qui rejoint le port de Marseille traverse par ailleurs les communes de Septème-les-Vallons et Marseille.

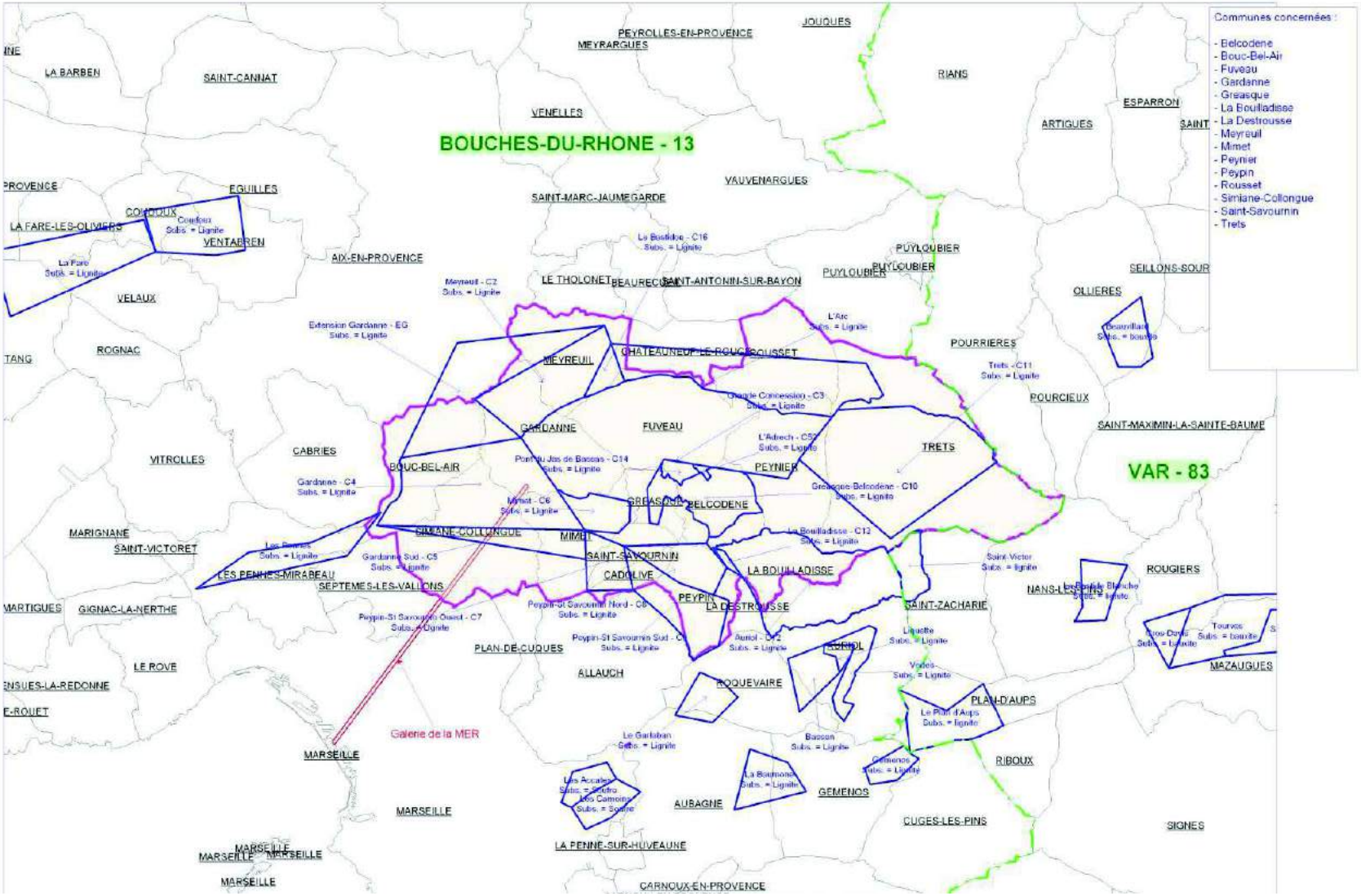


Figure 3 : Périmètre de l'étude détaillée des aléas

3 TRAVAUX REALISES ET DEMARCHE ADOPTEE

Dans le cadre de l'étude préliminaire des aléas menée entre 2006 et 2009, les données cartographiques de base, conformément au guide méthodologique pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers (cf. [3]), étaient essentiellement issues des planches des dossiers d'arrêt de travaux ou de renonciation déposés par les Charbonnages de France (CdF).

En particulier, le contour et les cotes des panneaux appelés « champs homogènes » d'exploitation (définis par CdF à partir des plans généraux cf. tableau 1 et figure 4), les données de localisation des ouvrages débouchant au jour et des dépôts de surface, galeries d'écoulements principales, les axes des galeries de niveau et travers bancs ont été convertis directement depuis les fichiers AUTOCAD issus des dossiers CdF.

Champs d'exploitation	Communes concernées	Période d'exploitation	Profondeur des travaux (GM)	Schéma d'exploitation type (Grande Mine)	Taux de défruitement moyen (GM)	Petites mines exploitées
Bordure des affleurements		Du XVIIème siècle au milieu du XIXème	0 à 60 m	Ciel ouvert (fosses) galeries filantes chambres et piliers anarchiques	inconnu	Mine de Gréasque 2 Pans Mine de l'Eau Gros Rocher 4 Pans Mauvaise Mine
Rocher Bleu	Gréasque, fuveau, Saint-Savournin, Belcodène	1860 à 1886	100 à 250 m	chambres et piliers irréguliers	75 à 85%	Gros Rocher 4 Pans
Valdonne	Allauch, Peypin, cadolive, Saint Savournin, Mimet	1860 à 1959	50 à 800 m	chambres et piliers irréguliers	75 à 80%	Gros Rocher 4 Pans Mauvaise Mine
Castellane-Léonie	Saint-Savournin, Gréasque, Peypin	1845 à 1920	120 à 500 m	chambres et piliers irréguliers	75 à 80%	Gros Rocher 4 Pans
Gréasque	Gréasque, Saint Savournin, Belcodène, Fuveau	1920 à 1976	200 à 700 m	chambres et piliers assez réguliers puis réguliers	75%	-
Lambeau Charrié de Gardanne	Simiane, Gardanne, Mimet,	1860 à 1969	100 à 700 m	chambres et piliers puis grandes chambres montantes remblayées	50 à 60%	Gros Rocher 4 Pans Mauvaise Mine
Longues tailles en Grande Mine en place	Bouc bel air, Gardanne, Simiane, Meyreuil, Fuveau	1930 à 2003	400 à 1300	Longues tailles foudroyées	Exploitation totale	-
Trets	Trets	1787 à 1935	0 à 480 m	Chambres et piliers Courtes tailles remblayées	inconnu	Mine de Gréasque Gros Rocher 4 Pans
Baume de Marron, La Bouilladisse, Pinchinier	La Bouilladisse, Peypin	1743 à 1911	0 à 140 m	Galeries filantes Chambres et piliers Petites tailles rectangulaires remblayées	Estimé de 70% à 80%	Mine de Gréasque 2 Pans Gros Rocher 4 Pans Mauvaise Mine

Tableau 1 : Caractéristiques des « champs homogènes » (source CdF)

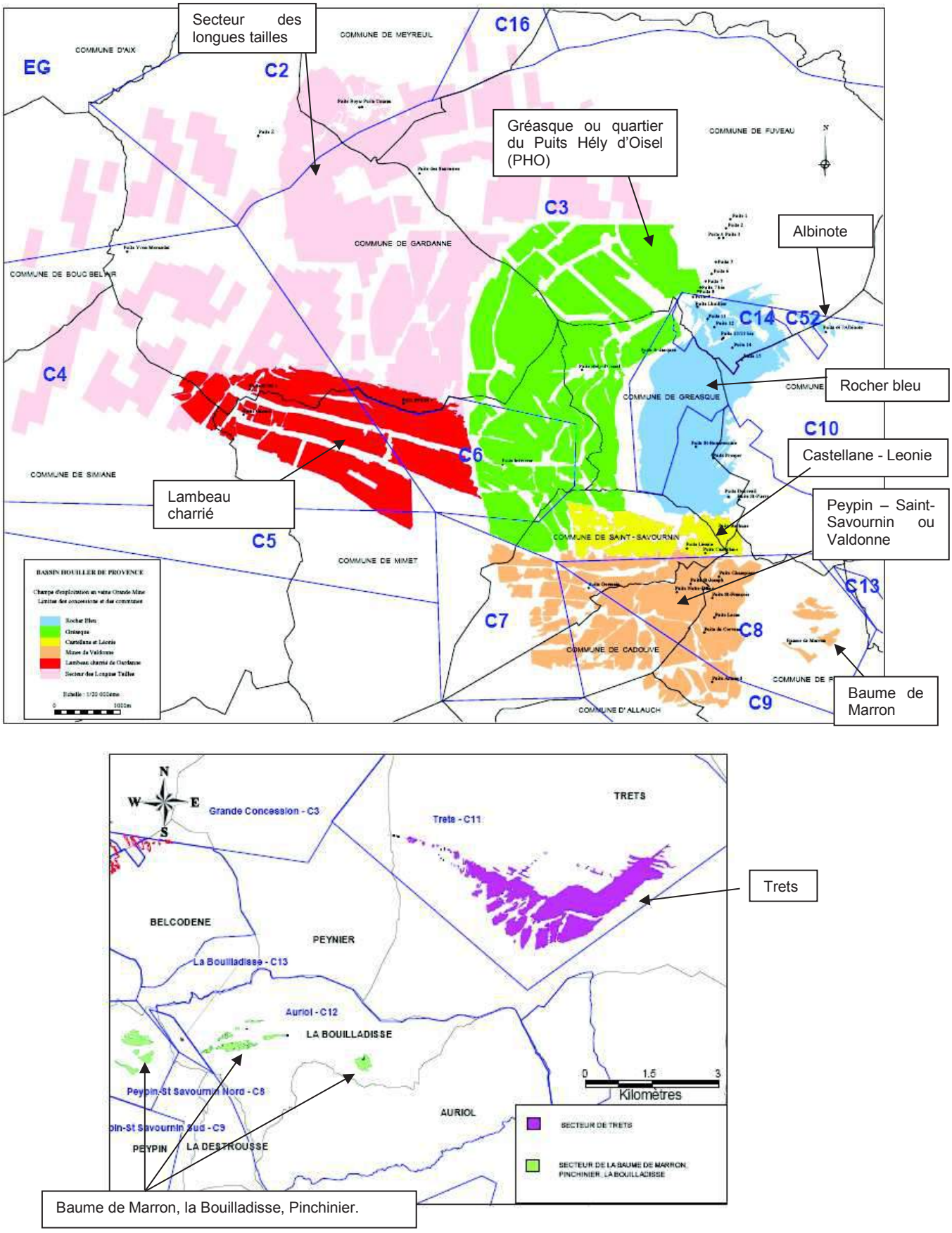


Figure 4 : Localisation des « champs homogènes » en couche Grande Mine (source CdF)

Pour affiner l'évaluation de l'aléa et la cartographie, la première étape a consisté en :

- la recherche et la collecte d'archives d'exploitation ;
- la numérisation et le géoréférencement des plans miniers sources.

Pour ce faire, un complément d'information a été réalisé auprès des Archives Départementales des Bouches du Rhône puis auprès du Département de Prévention et de Sécurité Minière Sud du BRGM qui possède le fond d'archives de CdF.

Remarque : Pour les plans des travaux souterrains, les Archives Nationales consultées étaient principalement constituées de procès-verbaux de visite et de plans de bornage des concessions. Ces données peu développées n'ont pas servies pour cette étude.

Ce complément d'information a principalement intégré une recherche des vieux plans des travaux de lignite et d'éventuels comptes rendus (procès-verbaux de visite, rapports…) dans le but de juger des schémas d'exploitation pratiqués au droit des secteurs soumis aux aléas. L'examen des plans sources est effectué par le traçage de zones homogènes (découpage en panneaux exploités, cf. § 5.1.6) défini par couches et selon des critères géométriques d'exploitation (formes, dimensions et méthode d'exploitation semblables). Lorsque les plans sources ne sont pas disponibles, les schémas d'exploitation des panneaux observés sur les plans généraux sont assimilés à ceux de zones proches. Plus de 1400 zones homogènes ont ainsi été définies sur l'ensemble du bassin.

Cette recherche a également concerné les plans de carrières souterraines de Pierres à Ciment dont une grande partie se situe au droit des exploitations de lignite. Aujourd'hui, des PPRN sont en cours prescrits ou approuvés sur plusieurs communes. Lorsque les données cartographiques ne sont pas encore disponibles, les plans des carrières souterraines recensés ont été géoréférencés. En l'absence de plan, des emprises globales ont été cartographiées selon les mêmes méthodes que celles employées dans le cadre des PPRN.

Outre les archives relatives à la configuration des travaux souterrains, cette phase informative a porté sur la production d'un Modèle Numérique de Terrains utilisé pour cartographier l'épaisseur réelle du recouvrement.

L'ensemble est formalisé sous un Système d'Information Géographique (SIG) élaboré sous le logiciel MapInfo®.

Des visites de sites ont été par ailleurs effectuées afin de réaliser un état des lieux non exhaustif des travaux de mise en sécurité, de visualiser les dépôts de surface, de lever d'éventuels désordres, etc…. En particulier, des levés de position de galeries techniques ou de têtes descenderies ont été réalisés, à la demande de la DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur, sur les communes de Fuveau et de Saint-Savournin dans le cadre d'une étude de risque et d'un projet d'implantation de lotissement (cf. [14] et [15]). Une vérification systématique des données attributaires de l'ensemble des ouvrages débouchant au jour a été menée par rapport aux informations issues des DADT.

Remarque : A cette occasion, les ouvrages figurant dans les DADT mais non cartographiés dans les fichiers AUTOCAD issus des dossiers CdF ont été ajoutés.

4 GEOLOGIE REGIONALE

4.1 Géologie

Le gisement exploité se présente sous forme d'un faisceau de 7 couches inséré dans les calcaires du Fuvélien, déposés en milieu fluvio-continental lacustre au crétacé supérieur.

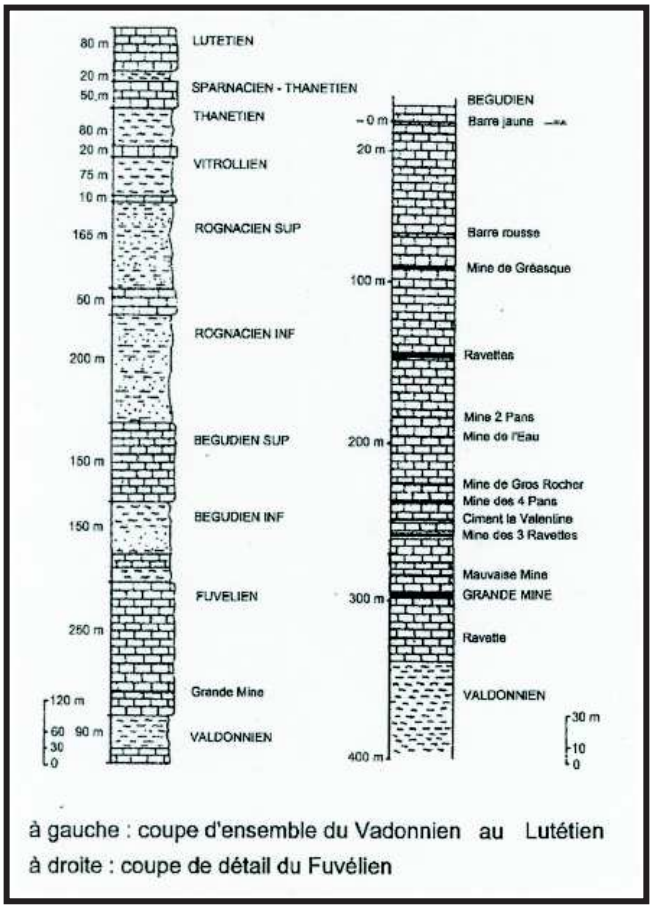


Figure 5 : Coupes stratigraphiques du bassin de l'Arc (cf. [9])

Le lignite se présente soit sous forme de filets de quelques millimètres d'épaisseur, généralement sans continuité, soit sous formes de veinules de quelques centimètres d'épaisseur appelées « ravettes », soit et surtout sous forme de sept couches exploitables appelées « mines ».Parmi ces couches, sept ont pu être exploitées, dont trois de façon très locale (« Mine de Fuveau » ou « Mine de Gréasque », « Mine des Deux Pans » et « Mine de l'eau »).

Ces différentes couches s'échelonnent, du toit vers le mur de la formation fuvélienne, de la manière suivante (cf. tableau 2) :

Nom de la couche	Espace entre les couches	Epaisseur moyenne[2]
« Mine de Fuveau » ou « Mine de Gréasque »	140 à 200 m au-dessus de Grande Mine (70 à 90 m sous la barre jaune marquant la limite entre le Fuvélien et le Bégudien)	0,90 m
« Mine des Deux Pans »	70 à 120 m au-dessus de Grande Mine (10 à 15 m au-dessus de Mine de l'eau)	0,40 m
« Mine de l'eau »	65 à 100 m au-dessus de Grande Mine (15 à 30 m au-dessus de Gros Rocher)	0,65 m
« Mine du Gros Rocher »	50 à 70 m au-dessus de Grande Mine (8 à 10 m au-dessus de 4 Pans)	0,80 m à 1,15 m dont 0,40 m de calcaire
« Mine des Quatre Pans	40 à 60 m au-dessus de Grande Mine	0,80 m à 1,55 m
« Mauvaise Mine »	7 à 10 m au-dessus de Grande Mine	0,80 m à 1,30 m
« Grande Mine »	Prise comme référence	1,80 m à 3,50 m (gisement en place) et 4,20 m à 5,30 m (dans Lambeau Charrié)

Tableau 2 : Caractéristiques des différentes couches de lignite

La couche grande mine est la plus épaisse à avoir été exploitée ; le charbon est un « flambant sec » riche en matières volatiles.

Remarque : Des exploitations souterraines de pierre à ciment (sous le régime des carrières) ont porté sur la couche « ciment la Valentine » et son mur, située entre la couche Grande Mine et 4 Pans, avec création de vides de 2,5 à 4 m de puissance, ce depuis l'affleurement jusqu'à environ 100 m de profondeur au maximum. Les aléas liés à cette exploitation ne sont pas abordés dans le cadre de la présente étude mais leur influence sur ceux liés aux exploitations minières a été évaluée et prise en compte le cas échéant. Ces exploitations sont matérialisées sur les cartes informatives.

En terme structural, le bassin se présente comme un synclinal dissymétrique avec des bordures perturbant la simplicité d'ensemble : chevauchement du Massif de l'Etoile au Sud de Gardanne (lambeau charrié) ; au Nord chevauchement de la Montagne Sainte Victoire.

[2] *La puissance des couches est très variable d'une extrémité à l'autre du bassin. Les épaisseurs indiquées dans le tableau ne fournissent donc qu'une valeur indicative.*

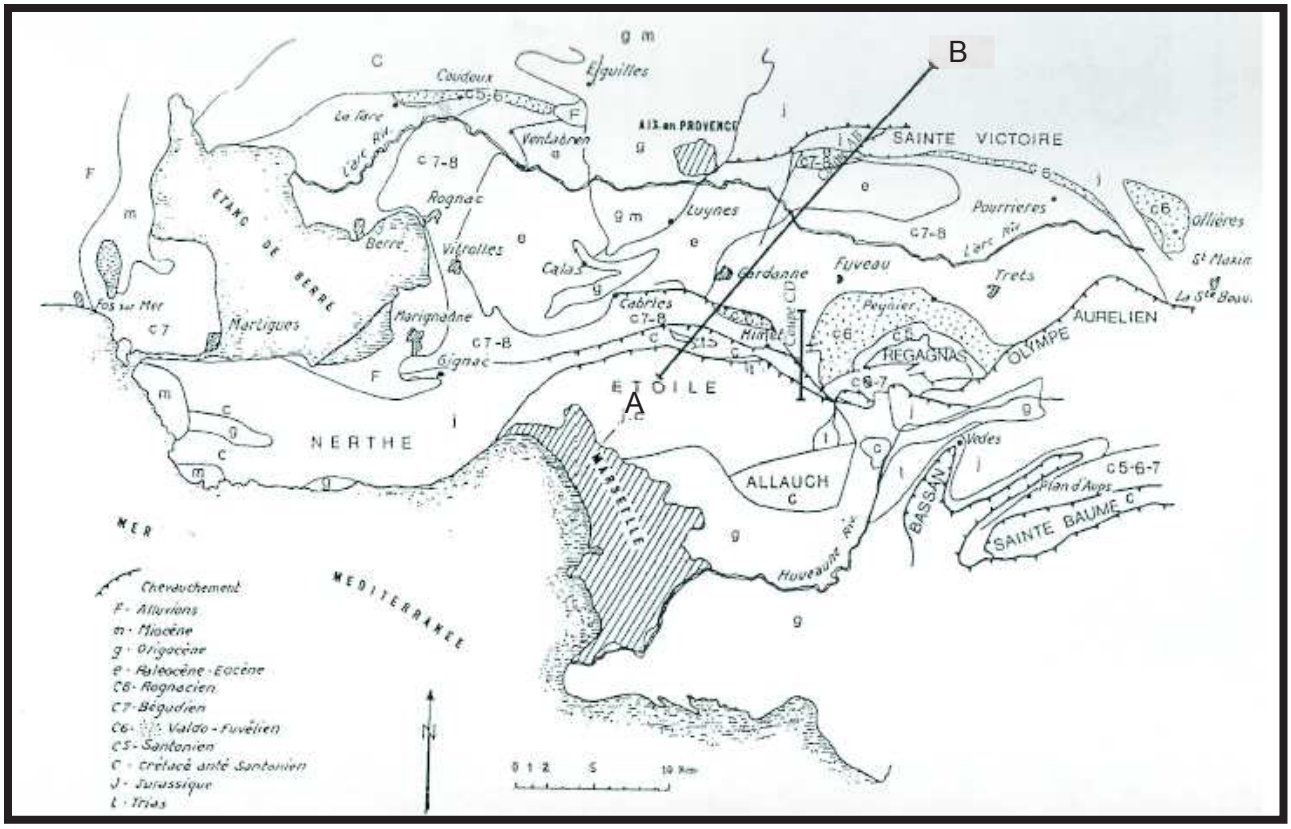


Figure 6 : Carte géologique du bassin (cf. [7])

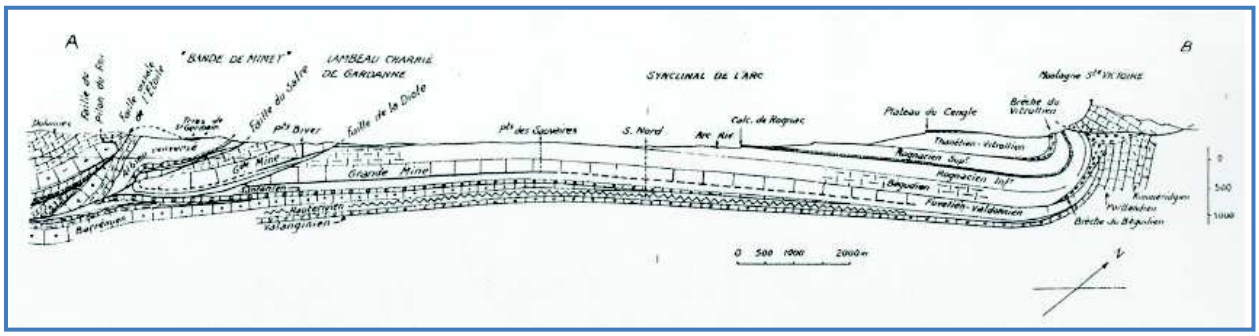


Figure 7 : Coupe géologique sud-ouest – nord-est entre la faille de l'Etoile et la Montagne Sainte-Victoire(cf. [9])

4.2 Hydrogéologie

L'hydrogéologie du bassin se caractérise en surface par la présence du bassin versant de l'Arc, alimenté par une trentaine d'affluents dont la Luyne, dans le bassin versant de laquelle se trouve l'essentiel des travaux miniers (cf. figure 8).

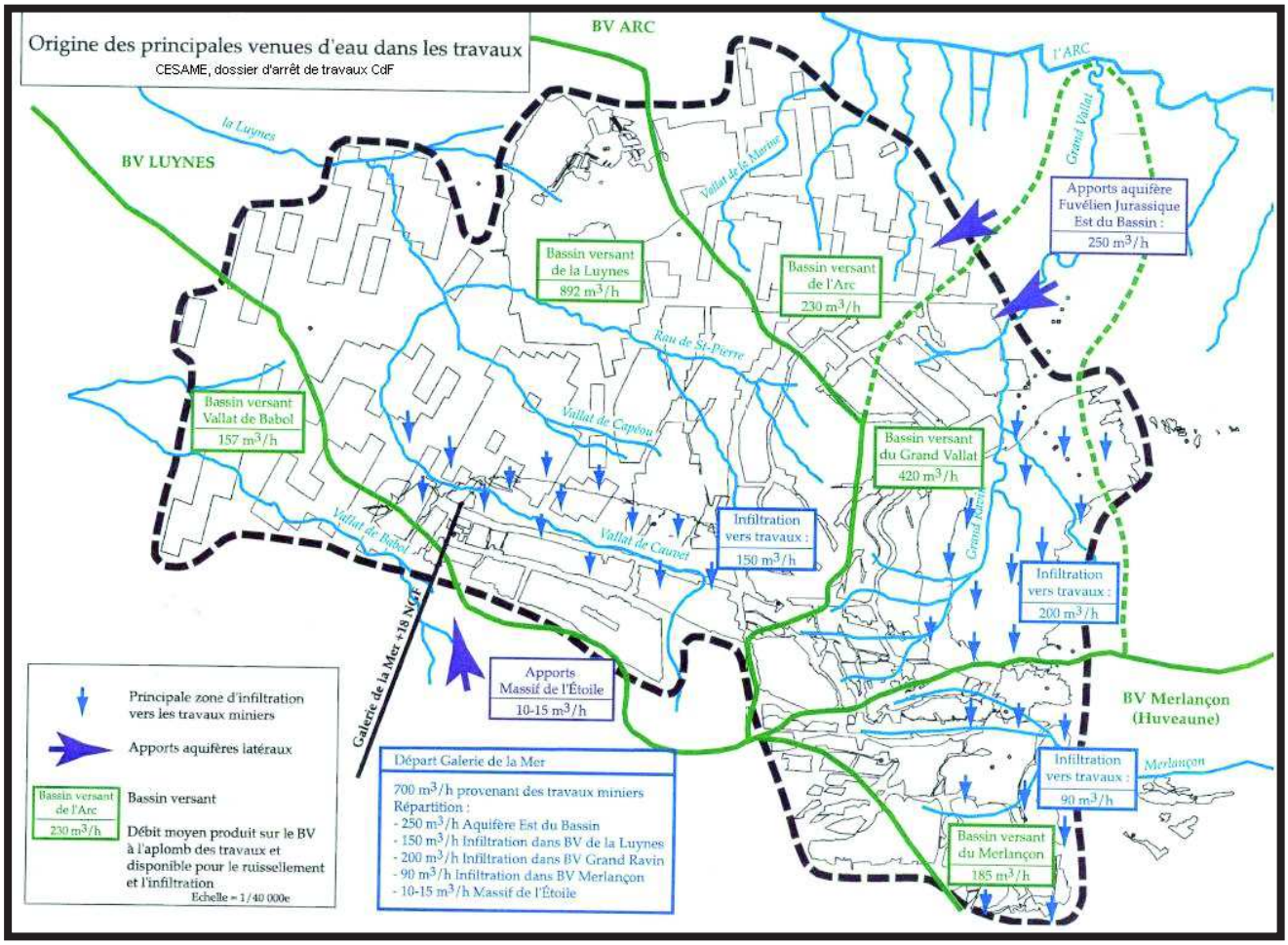


Figure 8 : Origine des principales venues d'eau dans les travaux (source DADT, cf. [8])

L'exploitation a entrainé la création de réservoirs aquifères constitués par les vides miniers, alimentés en partie par l'impluvium sur les affleurements du Fuvélien, par des infiltrations en provenance du massif de l'Etoile et par des circulations dans les calcaires karstiques.

Pendant l'exploitation, la mine était maintenue hors d'eau par des pompages pour les travaux profonds, par des galeries d'écoulement gravitaire pour les petits quartiers isolés ou les amonts pendages. Six galeries présentent ainsi un écoulement significatif aujourd'hui.

La Galerie de la Mer, creusée entre le puits Biver et le port de Marseille, longue de 14,6 km avait été réalisée pour régler des problèmes récurrents de drainage des travaux. C'est elle qui, à terme, devra assurer le rôle de drainage du réservoir minier principal dont le remplissage suite à l'arrêt de l'exhaure est en cours (voir figure suivante). Le suivi de la remontée est effectué par le DPSM au moyen de deux sondes dans les puits Z et Y. Le volume de ce réservoir, le seul dont la situation hydrogéologique n'est à ce jour pas stabilisée, a été estimé à 40 millions de m^3 (pour une stabilisation à terme à + 18 m NGF).

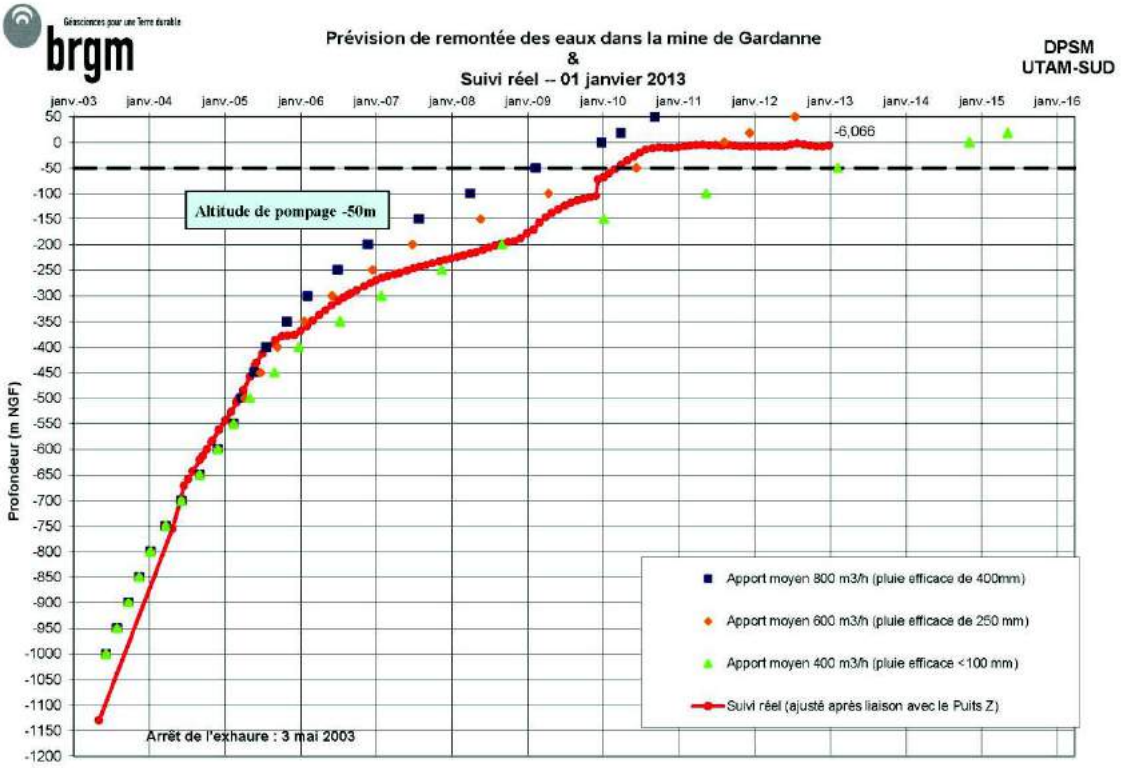


Figure 9 : Suivi de la remontée des eaux depuis l'arrêt de l'exhaure (d'après rapport suivi BRGM/DPSM pour la DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur).

Depuis aout 2010, un pompage a été enclenché au puits Gérard ayant pour objectif de maintenir le niveau d'eau dans le réservoir et de l'injecter par conduite en PEHD jusqu'au large du Vieux Port de Marseille. Cette injection permet d'éviter les effets visuels et le colmatage du fond du port en sortie de galerie redouté eu égard à l'oxydation du fer dont la teneur peut temporairement être élevée. Lorsque les teneurs seront jugées compatibles avec un rejet direct au port, le pompage sera réduit puis stoppé jusqu'au débordement gravitaire à la cote + 18 m NGF.

5 HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION

Le bassin de lignite de Provence a fait l'objet dès le milieu du XV^{ème} siècle d'autorisations de recherche pour la « pierre à charbon ». Cependant, ce n'est que dans de la seconde moitié du XVI^{ème} siècle que les archives signalent les premières recherches et découvertes de charbon dans la région de Gardanne, de Peypin, de Fuveau et de Valdonne. Il y est également fait mention d'actes de cession de mines concernant les communes de Peypin et de Saint-Savournin. L'exploitation effective semble remonter aux alentours de 1600, mais resta artisanale jusqu'au début du XIX^{ème} siècle. C'est à partir de la mise en place d'une véritable législation minière en 1810 que plusieurs concessions furent créées (jusqu'à 24 concessions pour 31 887 ha) dont l'histoire des fusions et des changements de titulaires durera jusqu'à la nationalisation au profit des Charbonnages de France en 1946.

Au total, on recense aujourd'hui 954 ouvrages débouchant au jour[3] (puits, galeries et descenderies), pour une exploitation menée jusqu'à plus de 1000 m de profondeur (profondeur du puits Yvon Morandat 1 100 m). Depuis 1946, la production a été de 76 millions de tonnes environ et correspond à un peu plus de la moitié de la production totale du bassin (environ 130 millions de tonnes nettes).

Dans le cadre de l'arrêt de l'exploitation, les concessions du bassin (cf. tableau 3) qui ont été reprises ou attribuées aux Charbonnages de France ont fait l'objet de procédures d'arrêt de travaux jusqu'en 2003.

Référence	Nom	Surface (ha)	Date d'attribution	Remarques
C2	Meyreuil	1 440	1902	
C3	Grande Concession	6 200	1809	
C4	Gardanne	2 950	1817	
C5	Gardanne Sud	696	1938	
C6	Mimet	440	1821	
C7	Peypin et Saint-Savournin Ouest	490	1922	
C8	Peypin Saint-Savournin Nord	680	1809	
C9	Peypin et Saint Savournin Sud	1 010	1823	
C10	Gréasque et Belcodène	1 050	1809	
C11	Trets	7 130	1809	
C12	Auriol	2 550	1813	
C13	La Bouilladisse	48	1922	
C14	Pont du Jas de Bassas	130	1843	
C16	Bastidon	200	1962	Extension postérieure à la nationalisation
EG	Extension du périmètre de Gardanne	2 130	1981	Extension postérieure à la nationalisation

Tableau 3 : Principales caractéristiques des concessions qui ont été reprises ou attribuées aux Charbonnages de France

5.1.1 Description des travaux miniers

Comme pour tous les bassins à longue histoire minière, les méthodes d'exploitation ont varié dans le temps, mais le bassin de Provence apparait comme un des plus riches à ce niveau, de nombreuses méthodes ayant été appliquées pour optimiser l'extraction.

[3] *Ce recensement est probablement incomplet dans la mesure où de nombreuses attaques sur les affleurements très anciennes n'ont jamais été cartographiées et ne sont plus visibles à ce jour*

L'exploitation au début du XVII^{ème} siècle était encore très artisanale, avec exploitation à ciel ouvert par fosses des couches proches de la surface. Par la suite, l'exploitation a été menée par galeries en couches et travers-bancs mais de manière assez anarchique et à des profondeurs restreintes (40 m au maximum au XVIII^{ème} siècle). On recensait déjà ainsi 267 galeries abandonnées en 1805. Au milieu du XVIII^{ème} siècle, les travaux miniers souterrains étaient encore conduits, de façon plutôt désordonnée, au-delà des affleurements à partir de plans inclinés. Les galeries au charbon s'enfonçaient jusqu'aux limites du tréfonds en rayonnant. Les profondeurs atteintes ne dépassaient guère 40 m pour l'ensemble des couches exploitées (d'après les informations retrouvées sur l'exploitation des Mines de Fuveau et de Gréasque). Les principaux quartiers exploités à cette époque étaient ceux de la Pomme, Champisse, la Dubreuil, la Poire, l'Albinote (Valdonne et Rocher Bleu), les Grandes Gorgues, les Trendas, Barberousse, l'Enfant d'Or (entre le Rocher Bleu et Peynier) et de Trets.

Dès la fin du XVIIIème siècle, l'exploitation se limita aux quatre couches les plus puissantes mais aussi les plus profondes Gros Rocher (GR), 4 Pans (4P), Mauvaise Mine (MM) et Grande Mine (GM).

A partir de la création des concessions en 1810 et jusqu'en 1850, l'exploitation du gisement était principalement réalisée dans la zone des affleurements, par la seule méthode des chambres et piliers.

L'approfondissement progressif des chantiers engendra une modification et une amélioration progressive des techniques et du schéma d'exploitation. Malgré un découpage des travaux encore aléatoire résultant d'un abattage sélectif et purement manuel, on donnait aux galeries une largeur de 8 à 12 m en laissant des piliers carrés de 8 à 12 m de côté.

La très remarquable solidité du toit permettait de se passer presque complètement du boisage. C'est pourquoi presque toutes ces exploitations induisaient l'abandon de piliers plus ou moins grands et nombreux et un remblayage très incomplet, sauf dans les « petites mines » (veines minces) où le dépilage effectué par tailles montantes (méthode dite en « arêtes de poisson » ou « doigts de gant ») était intégral et le remblayage à peu près total.

Le début du XX^{ème} siècle fut marqué par des progrès sensibles dans les méthodes d'exploitation. On peut citer ainsi le remblayage hydraulique dans les travaux du Lambeau de Gardanne, la méthode des longues tailles foudroyées avec étançons en Grande Mine et le développement, vers 1930, de la méthode des tailles montantes remblayées pour l'exploitation des « petites mines » à la place de l'ancienne méthode en « arêtes de poisson ».

5.1.2 Exploitations artisanales anciennes

A proximité des affleurements et jusqu'à 50 m de profondeur (très rarement 100 m) diverses méthodes ont été utilisées mais leur localisation est mal connue. On y trouve des galeries filantes (cf. figure 10), des dépilages en sapin (arêtes de poisson, cf. figure 11) ou par élargissage. Ces méthodes ont été de mise en œuvre jusque vers 1850. On peut considérer que les couches entre l'affleurement et les travaux modernes ont pu être exploitées ainsi. Une partie des travaux peut être éboulée, mais il peut rester une partie non négligeable des vides créés.

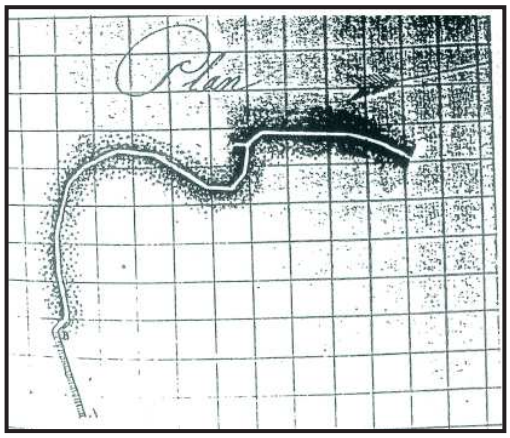


Figure 10 : Galerie filante avec exploitation au pic - Source CdF

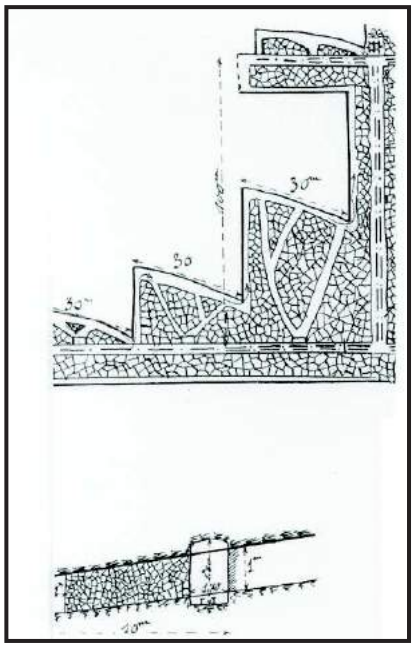


Figure 11 : Schéma d'exploitation en arêtes de poisson - Source CdF

5.1.3 Exploitation par chambres et piliers abandonnés

Cette méthode fait partie des méthodes d'exploitations sites partielles. Elle consiste à extraire le charbon en laissant des piliers en place pour assurer le soutènement du toit et des chambres vides (cf. figures 12 et 13). Le dimensionnement des piliers a considérablement varié dans l'histoire de l'exploitation, mais le taux de défruitement (rapport entre la surface déhouillée et la surface totale du panneau exploité) varie entre 50 % et 90 %, avec une moyenne à 75 %. L'évolution de la technique a consisté à élargir les galeries pour faciliter le passage des engins. On est ainsi passé de galeries de 4 m vers 1800 à 10 ou 11 m dans les années 1950.

Globalement il y avait peu de soutènement (toit raide). Parfois, les piliers pouvaient être repris pour augmenter la production, voire remplacés par des « rangles » (piliers artificiels).

La plus grande partie des zones exploitées par cette méthode l'ont été en couche Grande Mine. Cette méthode a été employée avec de nombreuses variantes plus ou moins mécanisées jusqu'en 1975.

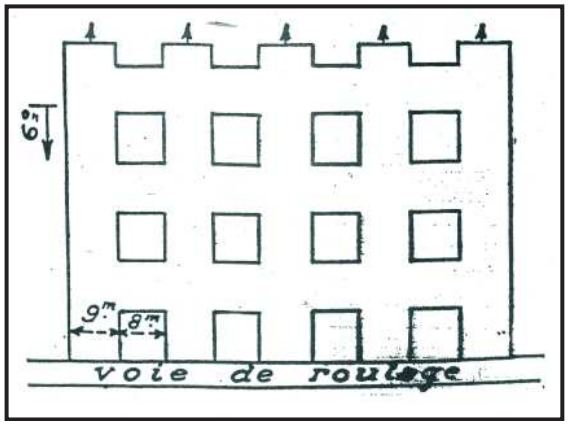


Figure 12 : Vieux travaux en chambres et piliers abandonnés de Valdonne – source CdF

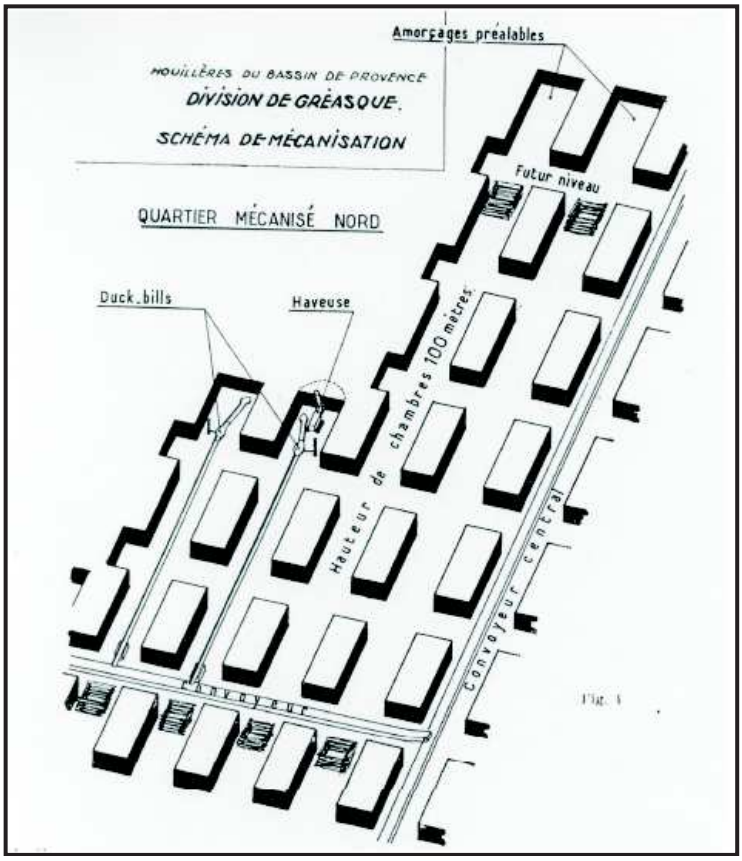


Figure 13 : Exemple de chambres et piliers abandonnés mécanisés – source CdF

Avec un charbon de résistance à la compression estimée entre 5 et 10 MPa, la stabilité des chantiers n'est assurée par les piliers (modèle aire tributaire) que jusqu'à une profondeur comprise entre 50 et 100 m (cf. [1] et [2]). Au-delà la stabilité repose sur l'équilibre entre les piliers en post-rupture (ou plastifié) et le toit épais et résistant formé des bancs massifs des calcaires du Fuvélien qui reportent une partie de la charge de recouvrement sur les bords fermes du panneau exploité.

Cette situation a été reconnue pour des chantiers situés entre 100 et 250 m à 300 m de profondeur où des ouvertures proches de l'ouverture initiale ont été observées (cf. [2]). Des chantiers plus profonds que 300 m ont présentés au contraire une convergence de l'ordre de 1 m entre le toit et le mur (piliers ruinés affaissables, cf. figure 14) avec une pliure du toit massif en bordure du panneau. Cette déformation des travaux miniers en cours d'exploitation s'est propagée partiellement au jour. Ce cas est appelé chambres et piliers ruinés. Il présente toujours des vides résiduels dont l'évolution, encore possible, pour atteindre le niveau d'affaissement leur correspondant, sera analysée.



Figure 14 : Pilier de charbon ruiné au sein d'un ancien quartier profond (cf. [2])

5.1.4 Exploitations par tailles remblayées

Ce type d'exploitation permet de récupérer la quasi-totalité du charbon. Dans le cas du Bassin de Provence, il induit la persistance d'une partie des vides après délaissement des chantiers, soit à cause d'un remblai ancien partiel ou du fait du non foudroyage du toit consécutif à la présence d'épis de remblais ou de rangles. Ce type d'exploitations était utilisé à plus grande profondeur que celles des chambres et piliers abandonnés.

Pour la méthode des courtes tailles (cette méthode est assimilée à celle des tailles montantes remblayées lorsque le pendage des couches augmente), le charbon a été extrait systématiquement sur un front de quelque dizaine de mètres (cf. figure 15). Le tri au fond permet de constituer des murs de pierres sèches (rangles) qui suivaient le chantier perpendiculairement ou parallèlement au front. Il est possible dans ces zones de rencontrer des vides résiduels car le remblai n'est pas total.

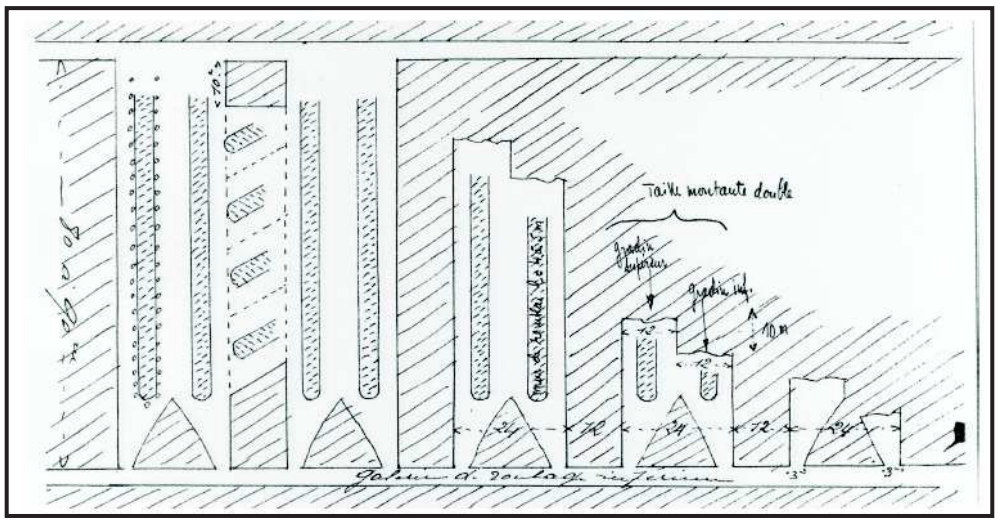


Figure 15 : Exemple de courtes tailles remblayées – source CdF

Dans la mine du Lambeau Charrié où l'ouverture atteignait 4,5 m, la précédente méthode a été utilisée entre 100 et 300 m de profondeur. Au-delà elle a évolué vers celle des chambres américaines à remblayage hydraulique (cf. figure 16). Sur le même principe, un dépilage de chambres au pendage de 8 m de largeur espacées de 7 m était réalisé sur l'ensemble d'une relevée de 100 m. Ces chambres étaient ensuite remblayées hydrauliquement. Finalement, après un long tassement des remblais (6 à 8 mois), les piliers de 7 m restants étaient repris.

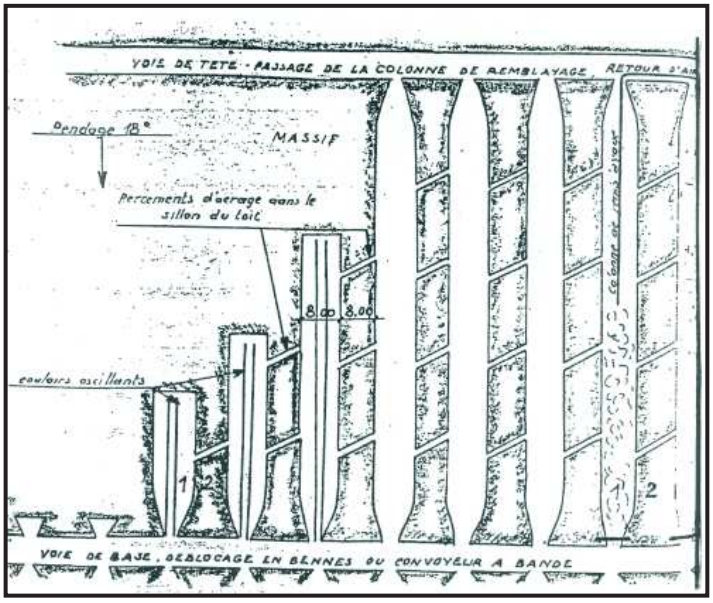


Figure 16 : Chambres américaines en Grande Mine (lambeau charrié) – source CdF

Dans ces méthodes, le soutien du toit ne peut être effectif que par la descente de celui-ci (et donc sa rupture) qui s'appuie sur les murs en pierres sèches ou le remblayage hydraulique. Faute de données, il est estimé que la convergence au fond est du même ordre pour ces tailles remblayées que pour les piliers affaissables.

5.1.5 Exploitation par longues tailles foudroyées

Cette méthode dite « totale » fut essentiellement utilisée en couche Grande Mine dans les quartiers profonds, là où l'exploitation devenait difficile (au-delà de 300 à 400 m de profondeur, cf. figure 17).

Elle consiste à avancer un front de taille sous forme d'une ligne de soutènement de grande longueur (plus de 100 m) parallèlement à elle-même, en provoquant l'effondrement de l'arrière taille. Le foudroyage entraine dans la foulée un affaissement de surface.

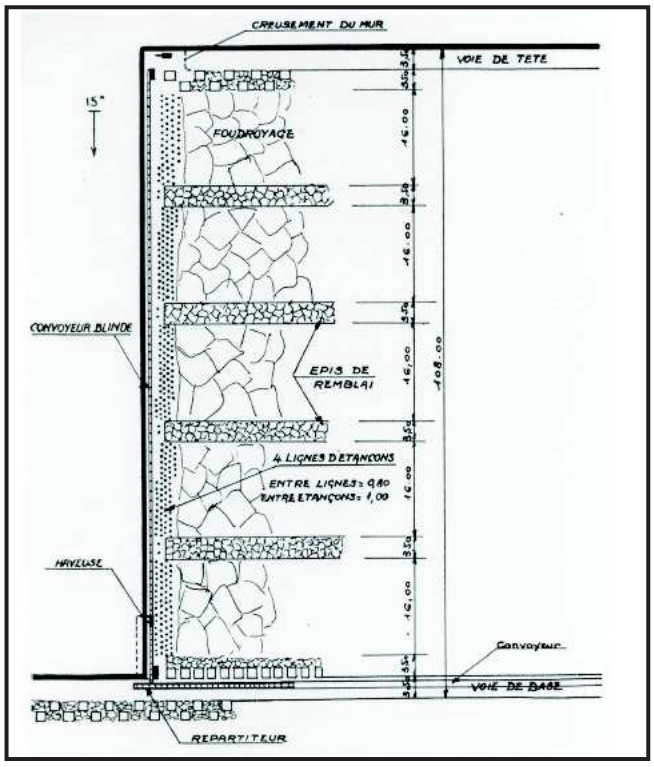
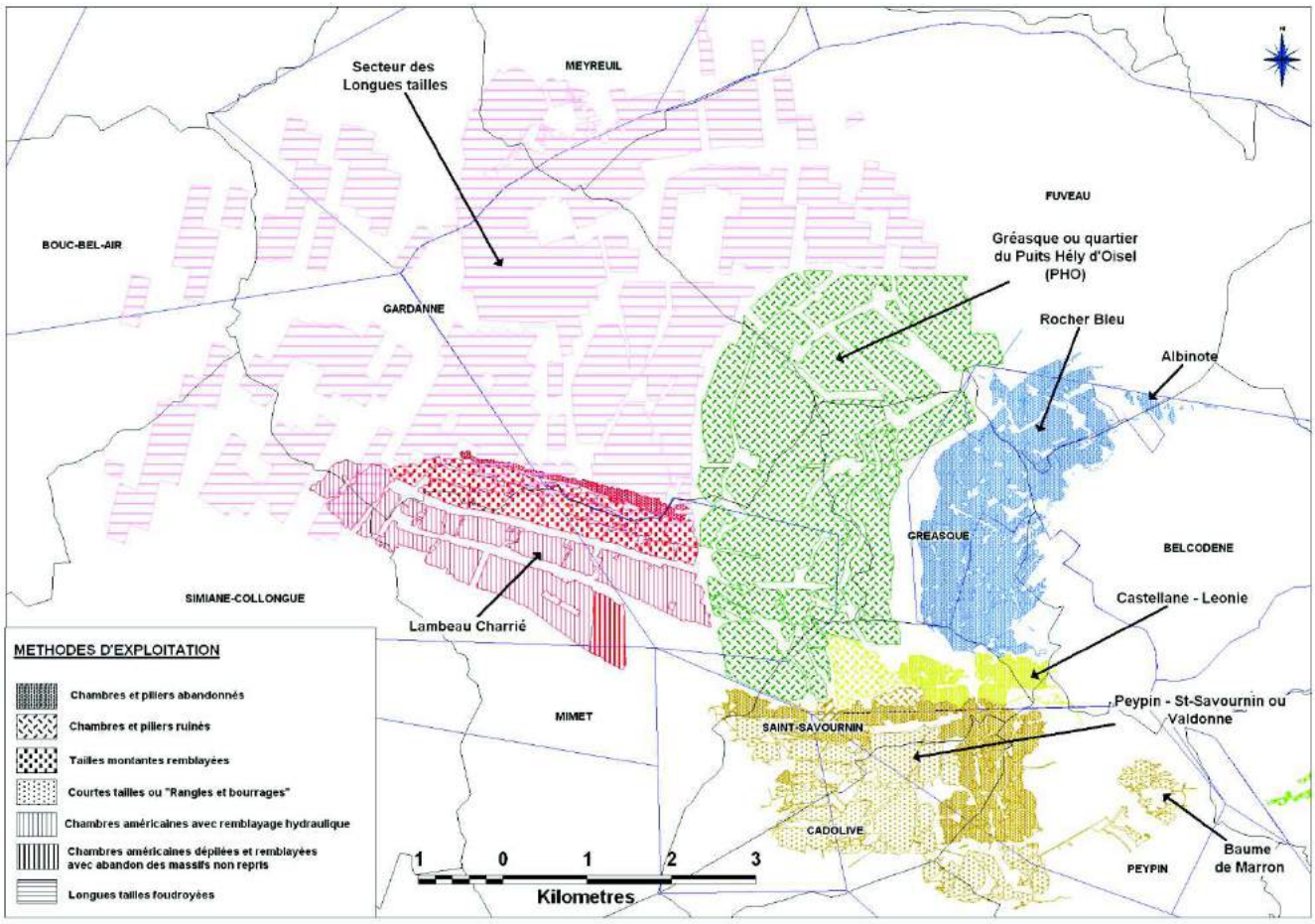


Figure 17 : Schéma d'une exploitation par taille foudroyée – source CdF

Cette méthode est celle qui à long terme a le moins d'impact pour l'utilisation de la surface. Elle a été menée à partir de 1928 à Meyreuil et jusqu'à la fin de l'exploitation.

5.1.6 Synthèse

L'apport et l'exploitation des plans sources a permis de préciser la cartographie informative en plus de 1400 « zones homogènes » d'exploitation (cf. § 3). En référence à la figure 4 du paragraphe 3 du présent document, la figure suivante synthétise le résultat, en couche Grande Mine, de cet affinage.



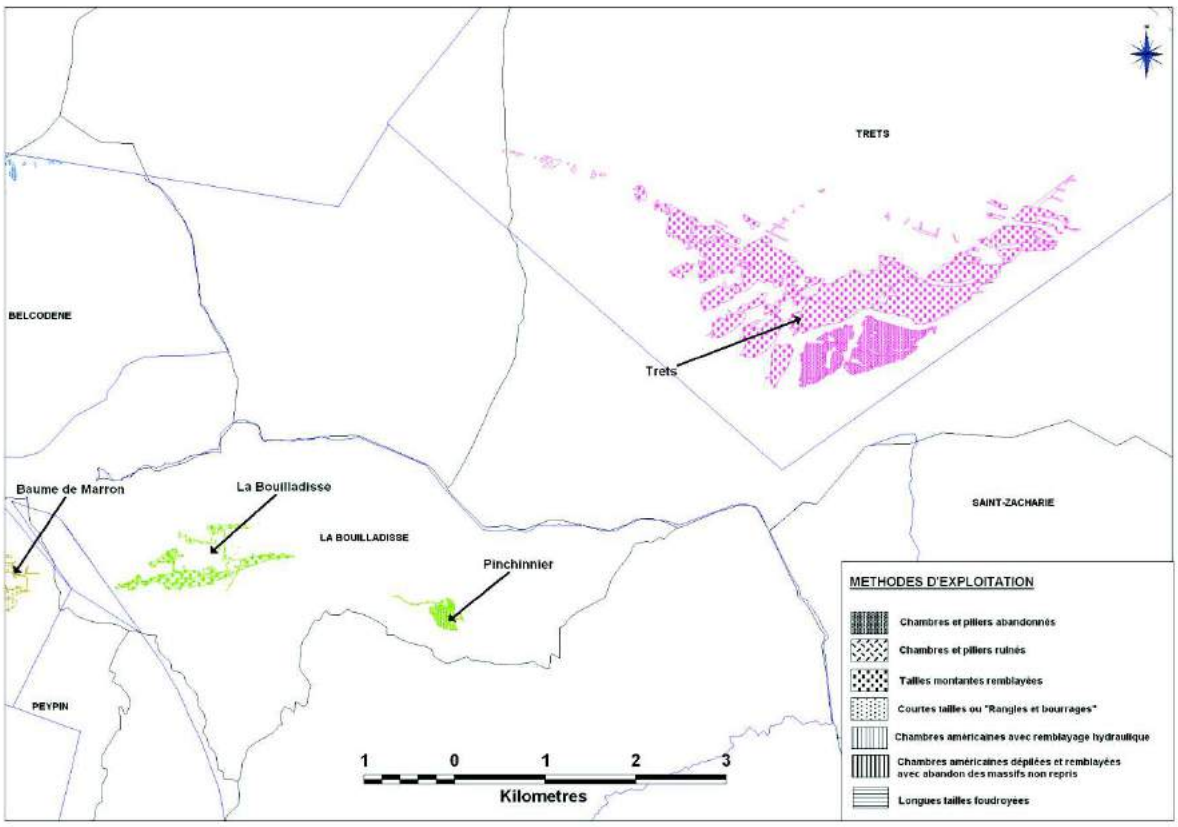


Figure 18 : Détail des méthodes d'exploitation en couche Grande Mine

6 ETAT DES CONNAISSANCES ACTUELLES DU BASSIN

6.1 Ouvrages débouchant au jour

Au total, il a été recensé 954 ouvrages débouchant au jour (ODJ) sur la Bassin de Provence.

6.1.1 Les entrées de descenderies

L'essentiel des ODJ du Bassin de Provence est constitué par des galeries pentées en couche ou en travers-bancs appelés descenderies et qui étaient dédiées à l'exploitation (cf. figure 19).

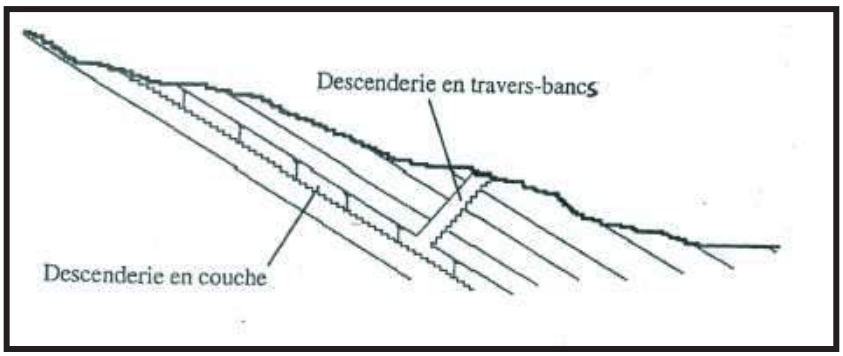


Figure 19 : Schéma de types de descenderies – source CdF

Les descenderies en couche présentaient une pente d'environ 30° environ, les descenderies en travers-bancs pouvaient être plus pentées (38 à 45°) et équipées de marches. Leur gabarit était voisin de 1,6 m de hauteur pour 1,5 m de largeur.

Au total, 820 ODJ de type descenderies ont été recensés par CdF. La moitié est annoncée dans les DADT comme colmatée naturellement ou « vérifiée et traitée suivant la procédure de fermeture des descenderies » sans détail supplémentaire. Pour l'autre moitié, les traitements ont été réalisés soit par remblayage et/ou dalle ou bétonnage de l'entrée.

6.1.2 Les entrées de galeries

Des galeries, toutes dites « techniques », étaient creusées horizontalement ou faiblement pentés dont le rôle était d'assurer l'écoulement des eaux d'exhaure, le roulage, le trainage, le stockage de matériel (amorcière, dynamitière) ou encore « l'enseignement » (mine école). Pour l'essentiel, leur section était de l'ordre de 4 à 6 m², mais certaines galeries d'écoulement présentaient des sections plus réduites de l'ordre d'1 à 1,5 m² (exemples des galeries d'écoulement de Fuveau, du Pradel à La Bouilladisse, de la Doria et de Castellane à Peypin, etc.).

Au total, 46 ODJ de type galeries ont été recensés par CdF et annoncées comme traitées de façon diverse suivant les configurations. Dans les meilleures conditions, les galeries de type amorcière, dynamitière ou de trainage ont été totalement remblayées ou embouées.

Le cas de la Galerie de la Mer débouchant dans le Vieux-Port de Marseille est particulier dans la mesure où l'ouvrage est surveillé et a fait l'objet de dossiers spécifiques. L'aléa a toutefois été évalué à son aplomb.

6.1.3 Les puits

Le premier ouvrage vertical remonte à 1820 (70 m de profondeur). Au total, 87 puits (dont 56 d'exploitation) ont été foncés, dont certains jusqu'à de grandes profondeurs (exemple du puits Yvon Morandat (ou Y) de 1100 m de profondeur). Les diamètres des ouvrages n'excèdent que rarement 6 m (puits Z à Gardanne 6 m, Puits Y à Gardanne 10 m, puits Armand à Peypin (7,2 x 3,6 m).

Remarque : Le puits de l'Arc situé sur la commune de Rousset, qui a rencontré une grosse venue d'eau lors du fonçage n'a jamais fait l'objet d'exploitation minière et est utilisé pour la ressource en eau. Sa localisation est fournie pour mémoire dans le fichier du SIG relatif aux ouvrages débouchant au jour. L'évaluation de l'aléa lié à ce puits n'a pas été réalisée dans le cadre de la présente étude.

Tous les puits de mine sont traités par dalle, bouchon avec ou sans remblayage, à l'exception du puits Gérard conservé pour le pompage (cuvelage bétonné avec une réservation pour une cage d'accès).

Parmi tous ces puits, certains n'étaient pas dédiés à l'exploitation mais principalement à l'aérage de galerie d'écoulement. Ces ouvrages étaient appelés « lunette ». On notera que cinq puits ou « lunettes » sont situés le long du tracé de la Galerie de la Mer. Certains sont restés ouverts et sont propriétés de la Société des Eaux de Marseille (puits Neuf et puits Saint-Joseph) ou de Saint-Louis Sucre (puits Saint-Louis). Le puits des Aygalades a été traité par CdF. Le puits de la Mure, non renseigné lors de la réalisation de l'étude, a été considéré comme sans traitement. Il est conservé comme issue de secours de la Galerie de la Mer.

A noter par ailleurs le recensement d'un ODJ de type sondage foncé en 2003 sur la commune de Fuveau dédié au dégazage des travaux en couches 4Pans et Grande Mine du Rocher Bleu.

6.2 Les dépôts : Verses et terrils

Parmi les 34 terrils inventoriés, d'ampleurs inégales, 7 ont fait l'objet par CdF d'études détaillées par rapport à la stabilité, à la gestion des eaux ou aux problèmes d'échauffement, avec parfois réaménagement de sites.

Leur origine, volume et composition sont variables. Le tableau 4 ci-après synthétise les principales caractéristiques des terrils du bassin de Provence.

Communes	Concession	Désignation du terril	Superficie ou volume	Commentaires
Meyreuil	C2	Défens	32ha	A fait l'objet d'études détaillées
Meyreuil		Grappon	6,5ha	A fait l'objet d'études détaillées
Meyreuil		Carreau de Meyreuil	Faible importance	-
Fuveau – Gréasque	C3	Madame d'André	13,5ha	A fait l'objet d'études détaillées
Gréasque		PHO	2,64 ha pour 0,1 Mm^3	Il constitue en partie la plate-forme de Pho
Gardanne		Sauvaires	35 ha	A fait l'objet d'études détaillées
Fuveau		Bramefan	78,6 ha	A fait l'objet d'études détaillées
Gréasque		Près neufs	-	Reconverti en zone industrielle
Gardanne		Félicie	1,6 ha	Carreau du puits de la Félicie
Gardanne	C4	Saint Pierre	14 ha	A fait l'objet d'études détaillées
Gardanne, Simiane		Molx	13 ha	A fait l'objet d'études détaillées
Mimet		Terril du puits Gérard	0,4 ha	-
Gardanne		Terril du puits Biver	1,1 ha	-
Gardanne		Dépôt entrée galerie St Pierre	-	-
Cadolive	C8	Pâté	69 000 m^2	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Cadolive, Saint Savournin		Terril du puits Léonie	75 000 m^2	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Cadolive		Notre Dame n°1	1 000 m^2	Hors code minier. Ter ril stabilisé, végétalisé
Cadolive		Notre Dame n°2	12 000 m^2	Hors code minier. Te rril stabilisé, végétalisé
Cadolive, Peypin		Rouvrières	30 000 m^2	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Peypin		Doria	1 500 m^2	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Peypin		Lecas	1 700 m^2	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Peypin		Cerveau	2 300 m^2	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Peypin		Armand	3 000 m^2	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Peypin		Baume de Marron	3 000 m^2	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Peypin	C9	Les deux terrils du Puits Armand	640 000 m^3	-
Cadolive et Saint Savournin		Terril du puits Germain	500 000 m^3	Ce terril a subi une combustion totale
Gréasque et Belcodène	C10	Terrils de faibles importances	Quelques ares	Ils sont constitués de remblais, pierres de mine et de fines de charbon. Hors code minier
Trets	C11	Un terril	-	A proximité du plan incliné Sainte Barbe, parcelle BY117, propriété des HBCM. Le terril est stabilisé, entièrement recouvert de végétation
La Bouilladisse	C12	Présence d'anciens terrils	De faible importance	Zone de Pinchinier. Totalement envahis par la végétation, devenus invisibles. Ils se situent sur des propriétés privés
Fuveau	C14	Terril de l'Huillier	1,6ha	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Fuveau		Terril du puits n°12	0,2ha	Hors code minier. Te rril stabilisé, végétalisé
Fuveau		Terril de la RN96	0,2ha	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Fuveau		Terril du puits 14	0,6ha	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé
Fuveau		Terril du puits 15	0,04ha	Hors code minier. Terril stabilisé, végétalisé

Tableau 4 : Principales caractéristiques des terrils recensés

A ce jour, quatre terrils font l'objet d'une surveillance trimestrielle par l'Etat ; terrils du Grappon, Défens, Sauvaires et Madame d'André. L'objectif fixé est de contrôler l'impact de l'échauffement résiduel sur l'état des terrils, de relever tous les désordres potentiellement à l'origine d'instabilités ou de nuisances environnementales et de vérifier l'état des dispositifs de prévention (fossés, bassins, clôtures, signalisations, etc.) mis en place. En 2014, un petit glissement superficiel en aval du bassin supérieur situé en pied du terril du Grappon a été constaté. Sur ce terril, un certains nombres de désordres (obturations de caniveaux, dégradation geomembrane du caniveau 5, etc.) ont également été constatés. Des travaux de confortement et de réparation sont actuellement en cours.

6.3 Les mouvements de terrain

Une évaluation pertinente des aléas de mouvements de terrain passe par un inventaire des évènements passés dont le témoignage est recherché par l'intermédiaire :

- D'enquêtes auprès de personnes cibles (maires, habitants des communes concernées, anciens mineurs ou descendants de mineurs,…) ; les témoins rencontrés ne se souviennent pas avoir vécu ou entendu parler d'instabilités notables ; les terrains sont considérés comme « solides ». Seul un évènement est relaté en 1974 à proximité du puits L'Huillier, avec dégâts sur le bâti ;
- De dépouillements d'archives (rapports journaliers d'exploitation, dossiers d'indemnisation, …) ; la consultation de ces données n'a pas mis en évidence d'informations essentielles vis-à-vis de la stabilité des chambres et piliers ; la majorité des évènements recensés se réfère aux phénomènes liés aux coups de toit (ou de couche), « phénomènes dynamiques » à l'origine de vibrations pouvant dégrader les bâtis en surface, et de quelques effondrements localisés. Le cas de « l'effondrement du Rocher Bleu », exceptionnel est décrit plus loin.
- D'examen de photographies aériennes ; leur examen n'a pas révélé de manifestation flagrante d'instabilité de terrain ;
- De recherches de mesures topographiques, sans résultat concluant ;
- De visites d'anciens travaux : 5 visites spécifiques ont été effectuées par l'INERIS et des équipes de CdF entre 1999 et 2002, dont une pour réaliser des prélèvements de charbon. Ces visites ont concerné :
    - Les vieux travaux en chambres et piliers dans la Couche Grande Mine dans le secteur de Trets : sous 70 m de couverture en bordure de massif vierge, dans un secteur présentant peu de soutènement, le toit apparaissait en bon état général, malgré un faux toit fracturé ; les galeries montraient une convergence marquée (1 m de vide résiduel pour une ouverture initiale de 2 m) ;
    - Quartiers de Regagnas et de l'Olympe : à Regagnas, le quartier exploité par chambres et piliers abandonnés en 1974 sous 200 m de recouvrement. Les piliers sont très fissurés, écrasés, avec une convergence ramenant la hauteur de vide à 1 m, 1,5 m pour une ouverture initiale de 2 à 2,2 m. A Gréasque, les murs de rangles bloquaient l'accès aux chambres d'exploitation. Les vides résiduels accessibles sont restreint et les murs de rangles sains ;
    - Quartier du Regagnas, secteur du puits L'Huillier : des mesures de convergence ont été effectuées en différents points (convergence de 0 à 1 m pour un éloignement du bord ferme de 40 à 197 m). Au-delà de 200 m du bord ferme, la convergence se stabilise, et pour des valeurs de plus de 0,7 m les piliers sont tellement écrasés qu'ils se rejoignent à la base ;
    - Lambeau charrié : visite d'un secteur exploité par tailles montantes en 1930. Si les travaux près de la bordure du massif sont en bon état, les vides sont envahis par les éboulis lorsque l'on s'en éloigne.
- De sondages de reconnaissance ; une importante campagne de sondages a été effectuée pour reconnaître la nature des terrains de recouvrement et la nature des vides. Ils ont permis de confirmer les éléments suivants :
    - dans le quartier de Regagnas, à 310 m de profondeur, l'ouverture résiduelle en couche Grande Mine était d'1 m, confirmant les observations réalisées lors des visites ; le toit est peu fissuré ;

- dans le quartier du Rocher Bleu, la convergence en couche Grande Mine entre 115 et 140 m de profondeur est quasi nulle, de même qu'en couche 4 Pans (90 m de profondeur) ;
- Mines de Valdonne : absence de convergence des épontes dans la couche Grande Mine à 50 m de profondeur et dans mauvaise Mine à une quarantaine de mètres de profondeur ;
- Dans le Lambeau Charrié, la veine Grande Mine, exploitée par longues chambres partiellement remblayées est ouverte sur 4,5 m, tandis que les autres couches exploitées par tailles montantes partiellement remblayées ne sont pas visibles en sondage ;
- Quartier Olympe (secteur Gréasque) : convergence des épontes comprise entre 1 et 1,1 m en Grande Mine à 200 m de profondeur.

Les désordres de surface finalement recensés sont peu nombreux :

- Affaissements de surface et phénomènes dynamiques liés à l'exploitation totale du gisement par longues tailles ;
- Un phénomène de glissement sur le terril du Grappon ;
- Un effondrement localisé sur la galerie de trainage de Valdonne ;
- Quelques effondrements localisés observés sur des têtes de descenderies sur La Bouilladisse ;
- Quelques déclarations de « dégâts » pour fontis ou coups de toit ;
- Un mouvement de terrain avec des manifestations cassantes (désordres du puits L'Huillier, 1974), probablement lié à l'exploitation en couche Grande Mine, avec ouverture de crevasses ;
- L'effondrement du Rocher Bleu (1879) : il s'agirait d'un effondrement qui a affecté l'exploitation en couche Grande Mine. Il a été ressenti à l'époque en surface jusqu'à Gardanne (à une petite dizaine de kilomètres), a entrainé la ruine d'un bâtiment à Gréasque et s'est traduit en surface par un affaissement à manifestations cassantes (ouverture d'une grande fente le long de l'affaissement). Il aurait été consécutif à un essai de reprise partielle de quelques piliers portant le défruitement dans le quartier considéré à 90 % et plus.

6.4 L'activité sismique

L'activité sismique du bassin est liée à des phénomènes dynamiques. Les coups de terrains, qui souvent n'engendrent pas de gros mouvement du toit des couches, peuvent par contre entraîner des soufflages violents du mur, avec projection de matériaux (jusqu'à 500 m^3) dans les galeries, détérioration des soutènements, etc. Les secousses les plus fortes peuvent atteindre 3 à 3,5 sur l'échelle de Richter et peuvent être à l'origine de dégâts de surface lorsque la magnitude dépasse 2. Ces phénomènes sont localisés aux fronts de taille en activité, aux voies d'accompagnement et de desserte, aux piliers de démarrage ou d'arrêt de taille et dans les vieux travaux (activité sismique « hors taille »).

L'activité sismique, très intense pendant l'exploitation se réduit aujourd'hui à l'activité « hors taille » (en dehors des zones d'exploitation). Les évènements sismiques enregistrés « hors taille » par CdF, entre 1994 et 2002, montrent qu'une activité dans ces secteurs persiste plusieurs années après l'arrêt de l'exploitation, même si elle est largement inférieure à l'activité observée pendant l'exploitation. Pour l'ensemble des quartiers arrêtés ont été mesurés :

- 600 évènements de magnitude supérieure à 1,5 ;
- 221 de magnitude supérieure à 2 ;
- 2 de magnitude supérieure à 3.

L'activité a été relevée jusqu'à une trentaine d'années après l'arrêt de l'exploitation à Meyreuil, mais l'exploitation était en cours à proximité.

Suite à l'arrêt des travaux et l'identification d'enjeux sur les zones d'affaissement à manifestations cassantes définies dans les DADT de CdF, un réseau de sondes micro-sismiques de surveillance a été mis en place par l'Etat. Sur ce réseau, au cours de la remontée des eaux dans les travaux miniers, entre 2008 et 2012, 1154 évènements ont été détectés dont l'essentiel est de magnitude inférieure à 2. La majorité de ces évènements se corrèle spatialement avec la progression du front d'ennoyage.

A noter qu'en décembre 2012 un événement sismique a été ressenti par la population sur la commune de Fuveau. Probablement d'origine « hors taille », cet évènement n'a pas engendré de mouvements de terrain en surface.

6.5 Gaz de Mine

6.5.1 Généralités

Sous l'appellation gaz de mine, on regroupe les différents gaz susceptibles d'être émis depuis les travaux souterrains vers la surface. Ces gaz peuvent être du méthane (grisou) issu des couches de charbon et désorbés suite à la détente des terrains, mais également du radon, de l'hydrogène sulfuré, du monoxyde ou dioxyde de carbone ou simplement de l'air désoxygéné.

Les rayonnements ionisants, dont le radon, ne sont pas du fait de la mine mais sont émis naturellement par l'encaissant rocheux et peuvent potentiellement s'accumuler dans les travaux miniers souterrains.

Dans le cas du Bassin de Provence, les mesures réalisées pendant l'activité minière des valeurs de dégagement spécifique (émission à la tonne extraite) étaient représentatives d'une exploitation moyennement grisouteuse à faiblement grisouteuse. Le grisou était composé à 80 % de méthane, avec une proportion de CO_2 de 10 % au maximum.

Les recherches effectuées dans les archives CdF, de la DREAL, et de l'INERIS montrent que toutes les concessions doivent être considérées comme grisouteuses.

Par ailleurs, tant que la remontée des eaux n'est pas achevée, l'émission de gaz est favorisée.

Des aménagements ont été réalisés dans le cadre de l'arrêt des travaux par CdF afin de contrôler l'évacuation de ces gaz : 3 puits de mine ont ainsi été équipés en dégazage (l'Huillier, Prosper et Béthune) afin de maintenir une liaison entre l'atmosphère minière et la surface. Ce dispositif a été complété par 5 sondages de décompression (Fuveau 2, Champisse, Gardanne, Mimet 3 et Lecas). Au début de la remontée, les gaz ont été évacués par l'aérage entre le puits Z et Gérard). La base du puits Z est maintenant ennoyée.

La composition du gaz de mine émis par les évents a fait l'objet d'un suivi d'abord par CdF puis par le DPSM. Les paramètres contrôlés sont le sens d'écoulement, la température extérieure, les concentrations en CH_4, CO_2, CO, H_2S et O_2 dans le flux sortant. Le suivi, jusqu'à ce jour, fait apparaître l'absence d'H_2S, un mélange pouvant être fortement désoxygéné (7,4 à 20,8 % d'Oxygène), peu de CO (0 à 1,2 ppm) du CO_2 (0 à 5,8 % et un peu de méthane (0 à 0,42 %).

Ces mesures, qui correspondent à un mélange potentiellement asphyxiant, sont conformes à ce qui avait été mesuré entre 1997 et 2002 au puits Léonie, en relation avec des travaux isolés du compartiment principal.

Pour les concessions de Trets (C11) et d'Auriol (C12), les travaux sont considérés comme faiblement grisouteux, mais l'ennoyage est stabilisé et les travaux peu profonds peu propices à des accumulations. Les mesures de méthane effectuées par CdF ont été négatives, mais la présence des autres gaz reste envisageable.

En ce qui concerne les « rayonnements ionisants », des mesures effectuées en différents points de la mine et sur le retour d'air du puits Gérard en 2001 ont mis en évidence une activité volumique en radon222 supérieure à 1000 $Bq.m^{-3}$. Par ailleurs, une étude réalisée entre 2003 et 2005 par la société ALGADE fait état sur 3 périodes de mesures différentes d'activités volumiques de radon au puits l'Huillier comprises entre 1240 et 1730 $Bq.m^{-3}$, largement supérieures aux valeurs observées en milieu naturel dans le secteur (60 $Bq.m^{-3}$). Des mesures ponctuelles sur les évents du Rocher Bleu et du Lambeau charrié ont également montré des activités de plusieurs milliers de $Bq.m^{-3}$.

Lorsque le réservoir souterrain est suffisamment important, les gaz peuvent s'accumuler et potentiellement migrer vers la surface sous l'effet d'un différentiel de pression entre le réservoir et l'atmosphère. Ce différentiel peut avoir pour cause des variations de pression atmosphérique, la remontée de l'eau dans les travaux (aujourd'hui stabilisé pour le réservoir principal) ou encore une augmentation de la pression dans le réservoir sous l'effet de la désorption depuis le charbon en place.

Cette remontée vers la surface serait favorisée particulièrement au droit des ouvrages débouchant au jour ou à travers la couverture lorsque celle-ci est assez perméable naturellement ou rendue perméable par l'exploitation souterraine. Néanmoins, un manque de retour d'expérience sur ces mécanismes et phénomènes dans le cadre des anciennes exploitations minières a amené GEODERIS à engager une réflexion sur le sujet.

6.6 Les échauffements

L'auto échauffement du lignite ou du charbon est engendré par des réactions exothermiques consécutives à des phénomènes d'oxydation sous l'effet de l'apport d'oxygène ou d'eau, en particulier lorsque la teneur en pyrite est élevée. L'échauffement des couches de matière organique peut se faire progressivement, jusqu'à atteindre des températures élevées et dégénérer en feux souterrains, qui suivant les configurations peuvent être à l'origine d'instabilité de surface ou de dégagements de gaz toxiques (sans parler des problèmes engendrés dans les chantiers pendant l'exploitation).

Ces phénomènes ont été observés au fond pendant la période d'activité minière ainsi que sur certains terrils y compris actuellement (Sauvaires, Défens). Ces échauffements aboutissent à terme à transformer en chaux les terrils. C'est déjà le cas pour les terrils anciens qui ont brûlés, et c'est en cours pour les deux terrils encore en échauffement.

6.7 Gestion des eaux et aux impacts environnementaux

6.7.1 Aspects quantitatifs

6.7.1.1 Impact de la remontée des eaux

L'exploitation minière est à l'origine de la création de réservoirs aquifères, les travaux souterrains se comportant comme des drains par rapport à leur encaissant. Le réservoir principal, en cours de remontée actuellement n'a pas de possibilité de stabilisation naturelle avant la cote + 18 m NGF (connexion de la Galerie de la Mer avec le puits Gérard).

Remarque : Le pompage temporaire au puits Gerard stabilise actuellement le niveau d'eau et évite le débordement des eaux par la galerie de la Mer, le temps nécessaire à ce que la qualité de l'eau soit compatible avec un rejet direct dans le Vieux Port de Marseille.

Ce nouvel état d'équilibre ne modifiera pas le fonctionnement des émergences actuelles :

- Galerie de Fuveau, au Nord de Fuveau ;
- Galeries de la Doria (+ 259 m NGF) et Castellane (+ 258 m NGF) sur la concession Peypin - Saint-Savournin Nord (C8) ;
- Galeries de Pinchinier et du Pradel (travaux de Pinchinier et de la Bouilladisse) ;
- Galeries Desfarges et Saint-Jean drainant les travaux de Trets.

Seule la Galerie de la Mer verra son débit augmenter. Pendant l'exploitation, elle présentait un débit moyen de 2900 m^3/h (dont 700 représentant l'exhaure minière : la galerie draine en effet des venues d'eau provenant des formations traversées. A pleine section, sa capacité d'écoulement a été estimée à 36000 m^3/h. Elle a été confortée et est surveillée. Toutefois, dans l'hypothèse très improbable où elle se colmaterait, le point bas susceptible de servir de point de débordement serait le Puits Z à + 218 m NGF (via une galerie technique à + 216 m NGF) ; ce puits a été aménagé de manière à pouvoir assurer le débordement des eaux vers le ruisseau du Payennet puis la Luynes. Le puits Boyer Coureau, situé à une cote équivalente a été, quant à lui, bouché par bouchon béton.

Si les communications n'étaient pas parfaites avec le puits Z, les mises en charge locales pourraient entrainer des débordements secondaires au droit des galeries suivantes :

- Saint-Pierre/Saint-Baudille à + 226 m NGF aménagée pour évacuer 400 m^3/h ;
- Gardanne Biver à + 229 m NGF, équipée pour évacuer 400 m^3/h ;
- Fuveau à + 230 m NGF, équipée pour évacuer 800 m^3/h.

En terme quantitatif, hors colmatage très improbable de la Galerie de la Mer, la remontée des eaux et la stabilisation du niveau d'eau dans le réservoir principal n'auront pas d'impact significatif sur le milieu. On notera depuis l'arrêt de l'exhaure que le ruisseau de la Luyne ne reçoit plus la fraction d'exhaure qu'elle recevait du puits Y.

Les vastes exploitations du Rocher bleu, situées au plus bas en couche Grande Mine à + 120 m NGF, sont hors d'eau et sont déconnectées des exploitations en aval (travaux du puits Hely d'Oissel) par une zone vierge d'une largeur minimale de 100 m. Les eaux d'infiltrations circulant dans les travaux Rocher Bleu sont collectées puis drainées en direction du puits Gérard par une seule galerie dite galerie Vanne 113 (débouchant à la côte + 113 m NGF dans les travaux). Dans le cas où cette galerie venait à être obturée, les travaux du Rocher Bleu, en l'absence de communication avec ceux situés en aval, pourraient être alors ennoyés.

6.7.1.2 Impact lié aux dépôts de surface

Certains terrils sont anciens ou stabilisés et végétalisés ou sont d'une taille ne laissant pas envisager de désordre significatif lié à des problèmes d'écoulement des eaux. Nous verrons que les phénomènes d'érosion sont intégrés dans le volet mouvement de terrain.

Certains ouvrages de plus grande ampleur ont fait l'objet d'aménagements spécifiques liés à la gestion des eaux :

- Terril du Défens : mise en place d'un bassin de rétention recueillant les eaux du talus Ouest et leur évacuation se fait par caniveau. Des problèmes de glissement récents (2009) affectent ce secteur. Des merlons, passages canadiens… ont été préconisés à l'époque. Une descente d'eau a été mise en place pour acheminer les eaux vers le bassin Ouest. Un bassin a également été mis en place côté Est ;
- Terril de Madame d'André : le terril étant déposé en travers d'un vallon, les eaux du Vallat d'Audibert sont canalisées sous le dépôt. Par ailleurs des aménagements de surface (chenal en partie sommitale de plateforme, fossé périphérique, bassin écrêteur) ont été réalisés pour limiter l'impact en aval sur la zone urbanisée. L'étude réalisée pour CdF insiste sur la nécessité d'un entretien du dispositif ;
- Terril Saint-Pierre : deux fossés concentrent les eaux vers un point de rejet dans le Vallat de Cauvet. Ce terril reçoit les écoulements de la galerie + 229 canalisés par fossé puis buse jusqu'à un ouvrage en pierre le long de la route communale ;
- Terril des Sauvaires : il occupe un vallon dont les écoulements étaient canalisés sous le dépôt. La canalisation était partiellement colmatée et un pompage a donc été mis en place pour évacuer l'eau s'accumulant à l'amont.

Comme indiqué au paragraphe 6.2, l'Etat a la charge de la surveillance de ces dispositifs de quatre terrils ; Grappon, Défens, Sauvaires et Madame d'André. Une étude spécifique relative aux inondations potentielles liées à ces dépôts a été réalisée (cf. [6]) dont les conclusions sont synthétisées au paragraphe 12 du présent document.

6.7.2 Aspects qualitatifs

Les connaissances bibliographiques sur les eaux contenues dans des mines de charbon et les analyses qui ont été réalisées dans le cadre des dossiers CdF font apparaître que les eaux de remplissage des travaux miniers du bassin de Gardanne se caractérisent essentiellement par leur minéralisation élevée, essentiellement en sulfates, ainsi que par la présence de fer, de manganèse et potentiellement de zinc et d'arsenic à l'état de traces.

On retrouve des caractéristiques relativement proches pour les eaux circulant à travers des dépôts issus des mêmes formations, encore que les terrils, essentiellement composés de stériles, sont plutôt influencés (hors dépôts anthropiques particuliers) par le faciès des terrains calcaires encaissants.

6.7.2.1 Effets sur les eaux de surface

Pour les émergences existantes, les analyses réalisées font apparaître des eaux à faciès plutôt bicarbonaté calcique, proche des eaux du karst, avec des teneurs en sulfates modérées. Les pH sont légèrement basiques et les teneurs en fer et manganèse faibles.

Ces émergences ne sont pas selon les études consultées, de nature à porter atteinte de manière significative aux cours d'eau récepteurs, dont la qualité est par ailleurs fortement dégradée par les activités humaines.

Le scénario prévu de stabilisation par la galerie de la mer n'engendrera pas de modifications de la qualité des eaux de surface (hors hypothèse hautement improbable du colmatage de la galerie qui ne justifie pas selon nous d'affichage particulier sur les cours d'eau potentiellement récepteurs).

6.7.2.2 Cas du rejet en mer

Les analyses effectuées en sortie de la galerie de la Mer pendant l'exploitation montrent une eau bicarbonatée calcique, un pH légèrement basique, pas de pollution organique d'origine minière et des teneurs en éléments toxiques en dessous des seuils de détection ou très faibles.

Ces eaux résultent du mélange des eaux d'exhaure et des différents apports alimentant la galerie.

Dans le cadre de l'arrêt des travaux, un suivi de la qualité a été programmé et est effectif depuis la mise en place du pompage. L'objectif principal est de surveiller la teneur en fer à l'origine des eaux de couleur rouille redoutées dans le Vieux Port de Marseille. Ce suivi consiste en un suivi hebdomadaire de la qualité des eaux au niveau du puits Gérard et d'une surveillance de l'impact sur le milieu marin en périphérie du point d'injection des eaux en mer (cf. [13]). La teneur en fer atteignait 45 mg/l à la fin 2015.

6.7.2.3 Effets sur les eaux souterraines

L'étude hydrogéologique réalisée pour CdF n'évoque pas la possibilité de contamination d'aquifère suite à la remontée des eaux dans l'hypothèse d'une stabilisation à + 18 m NGF. Selon les données connues et présentées par CdF, la mine resterait alors drainante par rapport aux formations environnantes et ne devrait donc pas entraîner de contamination d'aquifères environnants.

7 CARTOGRAPHIE INFORMATIVE

Les cartes informatives communales sont présentées en annexe 1. Pour faciliter la lecture et l'impression des cartes par commune, l'échelle du 1/10 000 a été choisie. Néanmoins, compte tenu de la précision des échelles des supports cartographiques utilisés (cf. paragraphe ci-après), il est estimé que l'échelle maximale de validité des cartes informatives est celle du 1/2 500.

Six cartes ont été réalisées : 1 par veine exploitée (soit 4 cartes), une carte relative au gaz, à l'eau et à l'environnement et une carte présentant l'ossature minière, les ouvrages de surface, les terrils et désordres.

Une version numérique au format PDF et JPG des cartes informatives par commune est fournie sur support informatique.

7.1 Supports cartographiques

Les informations cartographiques relatives au site (fond et surface) sont disponibles à plusieurs échelles, entre autres :

- BD ORTHO® de l'IGN avec une résolution de l'ordre de 50 cm et une précision de l'ordre de 3 m ;
- SCAN 25® de l'IGN à l'échelle du 1/25 000 ;
- Cartographie CdF essentiellement à l'échelle du 1/5 000 et réalisé sous le logiciel Autocad ;
- plans d'exploitation papiers issus des archives (échelle comprise entre 1/1 000 pour les plans de détail des chantiers et 1/10 000 pour les plans d'ensemble).

Pratiquement, sur la totalité des documents examinés (environ 2000 références et 1000 plans répartis dans les différentes archives), l'ensemble des plans d'exploitation du fond (plans de détail des chantiers et plans d'ensemble), de la fin du XIX^{ème} siècle jusqu'à l'arrêt total de l'exploitation a été consulté. Les plans jugés pertinents pour l'étude (environ 70) ont été par la suite numérisés afin d'assurer un meilleur géoréférencement.

7.2 Incertitudes de localisation

L'affichage de l'aléa lié à un élément minier intègre l'extension du phénomène, l'incertitude de localisation intrinsèque de l'ouvrage ou du secteur de travaux concerné et une incertitude propre au support cartographique.

L'incertitude de localisation relative à l'ouvrage minier dépend des éléments ayant mené à son positionnement. Si les ouvrages relevés sur le terrain au DGPS se voient attribuer une très faible incertitude (de quelques décimètres à quelques mètres), ceux dont la position est tirée d'anciens croquis portant peu de points de repère se voient attribuer l'incertitude du plan dont ils sont issus. A ceci doit s'ajouter l'incertitude liée à la reproduction du plan. En effet, photographier un plan provoquera une incertitude plus grande que de le scanner.

Le support cartographique (SCAN 25® IGN, photogrammétrie, BD Ortho® IGN) de par sa précision est lui-même vecteur d'une erreur de positionnement indépendante des ouvrages miniers. Elle est de l'ordre de 20 m environ pour le SCAN 25® IGN, et estimée à *3 m* pour la BD Ortho® IGN.

Ces incertitudes n'apparaissent pas en cartographie de phase informative, mais sont incluses dans les marges prises en compte pour l'affichage des aléas.

7.2.1 Incertitudes sur la position des éléments de surface

Les incertitudes de positionnement des points ponctuels ou de zones en surface (ouvrages débouchant au jour, désordres, dépôts et infrastructures) sont évaluées à partir des données cartographiques, des données GPS et des informations issues des archives et en particulier les DADT de CdF.

Ouvrages débouchant au jour

Dans le cadre de l'étude préliminaire des aléas, l'incertitude globale des ouvrages débouchant au jour retenue était de 10 m selon les données de CdF. Une vérification par un levé GPS sur le terrain de quelques dizaines d'ouvrages (échantillon statistique) encore visibles ou matérialisés par dalles ou bornes (positionnées sur la tête de l'ouvrage après la fermeture) a confirmé les positions CdF avec une incertitude de 5 m. Cette valeur est nouvellement retenue pour tous les ouvrages définis comme « levés » dans les DADT de CdF. Pour les ouvrages définis comme « non levés », la valeur d'incertitude de 10 m est maintenue.

Dépôts

Les emprises des dépôts ont été cartographiées de manière précise par CdF. Elles ont été ainsi reprises des fichiers informatiques (Autocad) de CdF sans ajout d'une incertitude de positionnement.

7.2.2 Incertitudes de localisation des travaux miniers souterrains

Dans le cadre de l'étude préliminaire des aléas, l'incertitude globale des travaux miniers souterrains retenue était de 10 m selon les données de calage de CdF. La numérisation et le géoréférencement des plans généraux et de détail des exploitations réalisés pour cette étude permet de confirmer la valeur d'incertitude de localisation des travaux prise égale à 10 m. En revanche, en l'absence d'éléments plus précis (plans de détail ou observations de terrain), elle est maintenue à 20 m pour la position des affleurements (pour les travaux potentiels non connus).

7.3 Système d'information géographique

Les éléments reportés sur les cartes informatives sont disponibles sous la forme d'un Système d'Informations Géographiques (SIG) établi sous un environnement MAPINFO 8.5®. Le système de coordonnées est le France Lambert 93. Ce SIG est composé des couches cartographiques suivantes :

- BD ORTHO® de l'IGN (prise de vue de 2007) ;
- SCAN 25® de l'IGN ;
- les limites des communes ;
- les limites des concessions ;
- les ouvrages débouchant au jour (puits, descenderies ou entrées de galeries) mis au format Geoderis et en précisant s'ils sont « visibles » ou « non visibles » (source DADT CdF) et traités ou non traités (source DADT CdF) ;
- les courbes d'isobathes des exploitations ;
- les tronçons de cours d'eau ;
- la limite d'ennoyage final attendu (+ 18 m NGF) des travaux miniers souterrains ;
- les affleurements ;
- les galeries d'écoulement et les exhaures minières potentielles ou avérées ;
- les évents du réservoir principal ;
- les désordres en surface ;
- les zones de dépôts ;
- les zones homogènes d'exploitations souterraines digitalisées à partir des plans de travaux miniers géoréférencés.

PHASE D'ÉVALUATION DES ALÉAS

8 LISTE DES PHENOMENES

L'étude détaillée des aléas est réalisée selon le guide méthodologique (cf. [2]) validé par l'administration et est conforme aux textes réglementaires qui précisent notamment la nature des aléas et risques pris en compte :

Les risques pris en compte (…) sont notamment, les suivants : affaissements, effondrements, fontis, inondations, émanations de gaz dangereux, pollutions des sols ou des eaux, émissions de rayonnements ionisants.

On notera que la mention, dans la réglementation, de l'adverbe « notamment » implique que la liste, quoique largement représentative des risques miniers, n'est pas strictement exhaustive et peut éventuellement être complétée.

Les informations rassemblées lors de la phase informative nous permettent d'identifier les différents aléas qui seront à retenir pour la deuxième phase de l'étude (analyse détaillée des aléas). D'après les connaissances acquises et la rétroanalyse effectuée sur d'autres bassins miniers très similaires, les scénarii accidentels ont été examinés pour en déterminer les intensités potentielles, les crédibilités de survenance et évaluer, ainsi, les niveaux d'aléas qui leur incombent.

9 NATURE DES ALEAS RESIDUELS RETENUS

L'évaluation et les cartographies présentées dans le cadre de cette étude concernent les aléas miniers liés **aux mouvements de terrain, aux échauffements et aux inondations**.

En revanche, compte tenu des mesures effectuées sur les gaz, l'aléa « gaz de mine » serait à envisager. **Faute de méthodologie (cf. § 6.5.1), cet aléa n'a pas été évalué dans le cadre de cette étude. La réalisation dans un premier temps d'une ou plusieurs campagnes de mesures est néanmoins recommandée**.

De même, la cartographie des aléas pollutions des sols ou des eaux n'a pas été réalisée, en l'absence de méthodologie validée. L'inventaire des dépôts a néanmoins été intégré dans la hiérarchisation nationale réalisée dans le cadre de la Directive sur les Déchets de l'Industrie Extractive (DDIE, cf. [12]). **On peut avancer que compte tenu de la substance exploitée, les impacts environnementaux ne sont pas majeurs ; des contrôles sont toutefois recommandés sur les eaux du réservoir principal pour confirmer les hypothèses quant à la qualité des effluents rejetés.**

Par ailleurs, l'activité sismique, intense pendant l'exploitation, apparaît comme la conséquence d'un réaménagement des terrains induit par la mise en place d'un nouvel état d'équilibre du champ des contraintes au sein du massif. Son origine est liée aux volumes extraits, mais également à des mouvements de failles, des explosions de piliers, des réajustements au sein des foudroyages dans les anciennes tailles, aux ruptures de bord de piliers de taille. Elle est beaucoup moins intense après arrêt de l'exploitation, mais une sismicité « hors taille » demeure après arrêt des travaux souterrains.

Par ailleurs, la mise en place du nouvel équilibre nécessite un temps relativement long et est perturbé par la remontée des eaux. Certains de ces évènements peuvent avoir des effets en surface sur le bâti, lorsque la magnitude dépasse 2.

La mise en place et le suivi du réseau micro-sismique confirme la recrudescence des évènements pendant l'ennoyage. Depuis l'installation de ces dispositifs de surveillance, plus de 1000 événements ont été détectés, entre 2008 et 2012 pendant l'ennoyage. Bien qu'il y ait une diminution des événements, la sismicité se poursuit aujourd'hui même si le niveau d'eau est volontairement stabilisé par le pompage au puits Gérard. Ainsi, dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de se prononcer pour la suite même si les dégâts potentiels seraient probablement très mineurs et la gêne occasionnée en surface légère.

Néanmoins, ce phénomène n'est pas retenu comme une source d'aléa durable sur le bassin de Provence. L'enveloppe correspondant au champ des longues tailles, qui n'a pas été sujet à des secousses sismiques, est reportée sur les cartes pour garder en mémoire cette source potentielle de nuisance.

Les cartes d'aléas se trouvent en annexe 2. Comme pour les cartes informatives et les cartes d'aléas par commune sont fournies avec le présent rapport sur supports informatiques.

Il est rappelé en préambule de cette évaluation que, conformément au guide méthodologique relatif à l'établissement des Plans de Prévention des Risques Miniers (cf. [3]), l'aléa résulte du croisement de la prédisposition d'un site donné à l'apparition du phénomène redouté avec son intensité.

10 EVALUATION DES ALEAS MOUVEMENTS DE TERRAIN

Les principales conclusions de l'expertise internationale menée en 2003 dans le cadre du DADT de CdF portant sur la stabilité des travaux souterrains sont les suivantes :

- Les exploitations totales et sèches (au-dessus du niveau statique) peuvent être considérées comme stables au regard de l'affaissement dans la mesure où il s'est déjà produit. Des tassements infimes de l'ordre du mm/an peuvent être observés par interférométrie radar. L'activité sismique diminue par ailleurs rapidement après l'arrêt des opérations minières. Pour les zones inondées, une reprise d'activité pourra être observée pendant la phase de remplissage, avec possibilité d'un léger soulèvement non brutal de quelques millimètres ;
- Le statut des exploitations partielles dépendrait selon cette expertise de leur profondeur :
    - en zone profonde (plus de 250 m sous la surface) et sèche, l'expertise conclut que les piliers sont déjà écrasés et que le recouvrement s'est effondré. La situation peut être considérée comme stable, avec possibilité d'un affaissement minime. Pendant la période de transition, les zones amenées à être inondées (peu nombreuses, l'essentiel étant déjà inondé) pourront être l'objet d'un faible affaissement ;
    - en zone intermédiaire (50 à 250 m sous la surface), les piliers ont été affaiblis mais les bancs du recouvrement ne sont pas effondrés et aucun affaissement ne s'est produit. L'instabilité peut se manifester de façon progressive et lente, avec éventualité faible de manifestations rapides et cassantes ;
    - en zone peu profonde (moins de 50 m sous la surface), des effondrements localisés peuvent se produire (formation de fontis de quelques mètres de diamètre), comme par ailleurs autour des ouvrages débouchant au jour. Cet aléa est limité par la bonne qualité du Fuvélien.

L'étude préliminaire des aléas produite en 2009 a confirmé les conclusions de l'expertise internationale. L'aléa de quatre phénomènes a été évalué. Il s'agit de l'effondrement localisé, l'affaissement (soit à caractère « souple », soit à caractère « cassant », cf. § 10.2.1), le tassement et le glissement. Selon le phénomène, l'aléa a été évalué à un niveau faible et/ou moyen. Le tableau suivant synthétise par phénomènes de mouvements de terrain, les aléas retenus dans le cadre de l'étude préliminaire.

Aléa	Mécanisme	Configuration	Niveau d'aléa retenu	Modalités de cartographie
Effondrement localisé	Fontis	Travaux avérés ou suspectés à moins de 20 m de profondeur	Faible	Extension latérale de 3 m + 10 m pour les travaux cartographiés (20 m pour les travaux suspectés)
		Travaux en chambres et piliers abandonnés situés à moins de 50 m de profondeur	Faible	Extension latérale de 3 m + 10 m liés à l'incertitude de calage CdF
		Galerie non traitée par remblayage intégral ou embouage et dont la profondeur est inférieure à 20 m	Moyen	Extension latérale de 3 m + 10 m liés à l'incertitude de calage CdF
	Débourrage et/ou rupture de tête de puits ou descenderie	Puis remblayés ou dallés dont le rayon est inférieur à 2 m. Têtes de descenderies traitées	Faible	Puits : extension latérale de 3 m + rayon du puits + 10 m incertitude CdF Descenderie : cercle de 35 m de rayon + 10 m d'incertitude de calage CdF
		Puis non traités et ouverts dont le rayon est inférieur à 2 m, ou remblayés ou dallés et d'un rayon supérieur à 2 m. Têtes de descenderies non traitées	Moyen	Puits : extension latérale de 3 m + rayon du puits + 10 m incertitude CdF Descenderie : cercle de 20 m de rayon + 10 m d'incertitude de calage CdF
Affaissement	Potentiellement cassant	Exploitations partielles critiques à sur-critiques (Largeur / Profondeur du panneau supérieur ou égal à 1) comprises entre 50 m et 250 à 300 m de profondeur	Moyen	Projection en surface d'un angle d'influence de 10° + 10 m liés à l'incertitude de calage CdF
	Souple	Exploitations partielles critiques à sur-critiques (Largeur / Profondeur du panneau supérieur ou égal à 1) comprises entre 50 m et 250 à 300 m de profondeur ou supérieur à 300 m selon la configuration des travaux	Faible	Projection en surface d'un angle d'influence de 35° (20° lorsque le Fuvélien est à l'affleurement) + 10 m liés à l'incertitude de calage CdF (génère une auréole autour de l'affaissement cassant lorsque les deux configurations sont possibles (différence entre les angles retenus pour chaque mécanisme)
Glissement de pente		Ensemble des terrils sauf carreau Meyreuil, près Neufs	Faible	Talus et marge en pieds de 15 à 25 m suivant terrils
Tassement		Tous les terrils	Faible	Emprise terrils

Tableau 5 : Aléas mouvements de terrain sur le Bassin de lignite de Provence retenus dans le cadre de l'étude préliminaire de 2009 (cf.[1])

Dans le cadre de cette étude détaillée des aléas, l'important travail de collecte d'informations et d'analyse ainsi que les réflexions sur les mécanismes et phénomènes de mouvements de terrain rencontrés, et en particulier l'affaissement, conduit à ce jour à un affinage de l'aléa tant en terme de niveau que de cartographie. La synthèse de ces travaux et des aléas retenus est présentée dans la suite du document.

10.1 L'effondrement localisé

10.1.1 Description du phénomène

Un effondrement localisé correspond à une rupture des terrains qui ne concerne qu'une zone d'extension limitée à quelques mètres en surface. L'apparition des effondrements localisés en surface est brutale et n'est généralement pas accompagnée d'indices précurseurs visibles.

Le phénomène d'effondrement localisé est causé par l'instabilité locale d'une cavité souterraine. Cette instabilité peut se propager au travers des couches situées au-dessus et créer de cette manière un cratère en surface. Les matériaux impliqués sont donc déplacés et déstructurés de manière importante. La figure 20 schématise les processus possibles à l'origine de ce type de phénomène.

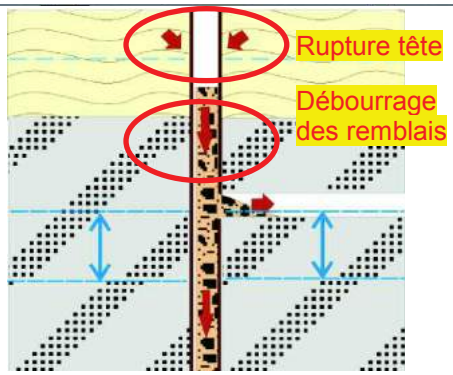
La vitesse de propagation de l'effondrement souterrain peut varier en fonction de plusieurs facteurs. Pour analyser la progression du phénomène et surtout son apparition en surface, deux conditions doivent être analysées :

- la stabilité des cavités qui se créent au cours de la progression du phénomène ;
- la possibilité d'un autocomblement de la cavité du fait de l'augmentation de volume des matériaux entre leur état « en place » et leur état « effondré ». Ce phénomène d'augmentation de volume est aussi appelé foisonnement.

En général, pour la majorité des massifs, l'altération et la fracturation augmentent lorsqu'on se rapproche de la surface. La stabilité d'une excavation de dimension équivalente est donc souvent moindre lorsqu'on se rapproche de la surface. Toutefois, la présence de couches compétentes ou ayant des propriétés spécifiques peut stopper la propagation de l'effondrement.

Le foisonnement des matériaux géologiques est un phénomène connu. Il n'est cependant pas mesuré de manière systématique et il n'existe aucun standard reconnu pour sa détermination. Le phénomène d'auto-comblement est donc difficile à évaluer de manière rigoureuse, mais on admet le plus souvent que la probabilité d'apparition d'un fontis en surface diminue (à cavité de dimension égale) avec la profondeur de la cavité. Pour les galeries isolées de dimensions habituelles (de 6 à 12 m^2 de section), les retours d'expérience permettent d'affiner la limite d'apparition du fontis en surface, qui se situe autour de 50 m de profondeur pour la cavité initiale. En revanche, des cavités de plus grandes dimensions comme des chantiers non remblayés par exemple, peuvent créer des fontis même si elles sont situées à plus grandes profondeurs.

S'il existe des approches basées sur l'évaluation naturaliste des coefficients de foisonnement, elles doivent également s'appuyer sur l'observation d'un nombre suffisant d'instabilités, survenues dans les mêmes conditions géomécaniques pour pouvoir être validées.



Mécanismes d'effondrements liés au puits

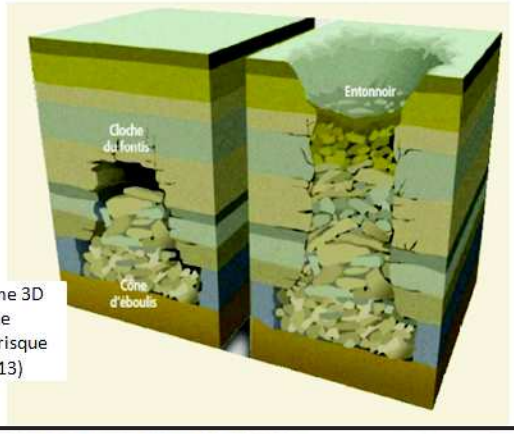
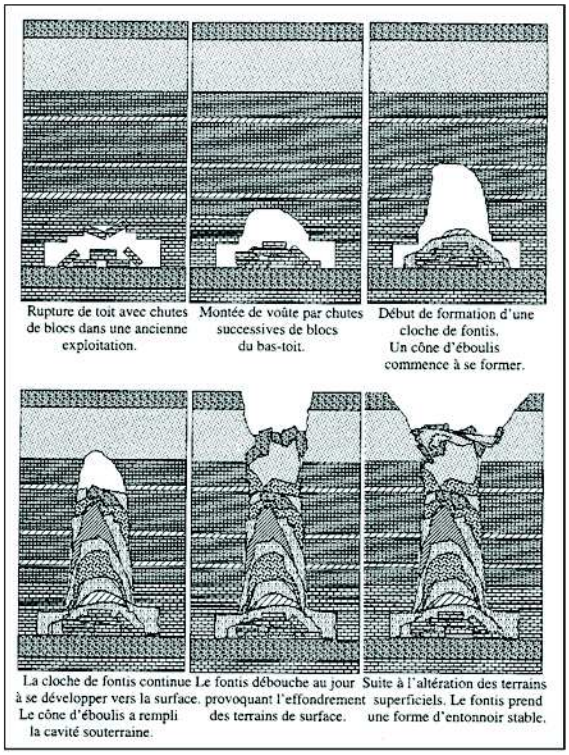
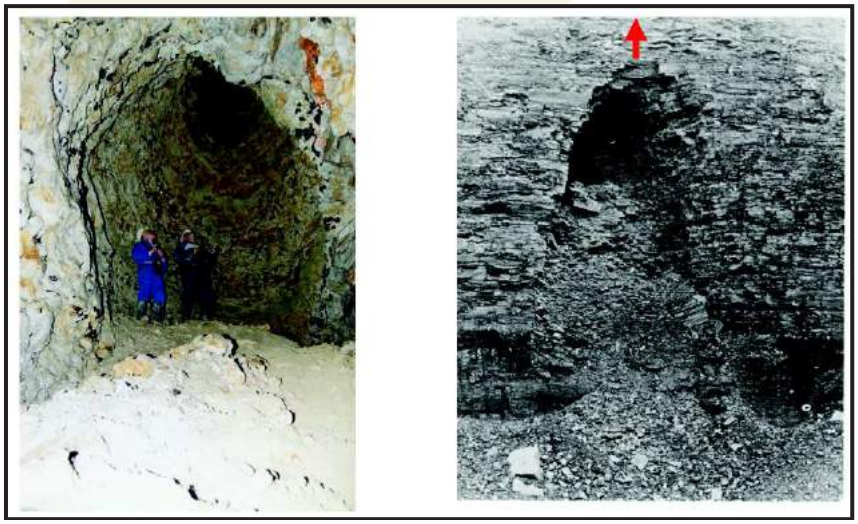


Diagramme 3D (source plaquette risque minier 13)



Processus de remontée de fontis



Exemples de remontée de cloche de fontis

Figure 20 : Schématisations des deux processus à l'origine des effondrements localisés retenus

Outre le guide méthodologique des aléas (cf. [3]), l'évaluation de l'aléa « effondrement localisé » s'appuie également sur des guides techniques réalisés spécifiquement pour ce type de phénomène et sur la base des retours d'expérience (cf. [10] et ([11]).

10.1.2 Zone d'altération superficielle

La zone d'altération superficielle correspond aux terrains à très faible cohésion et donc facilement mobilisables, susceptibles d'être immédiatement affectés par une instabilité.

L'épaisseur de la zone d'altération superficielle est un paramètre déterminant pour les dimensions des désordres potentiels, elle est donc importante pour l'estimation de l'intensité du phénomène d'effondrement localisé.

En raison du contexte géologique composé de roches mécaniquement résistantes (calcaires du Fuvelien), mais en l'absence de données précises secteur par secteur (possibilité de remblais de surface, etc.), l'épaisseur de matériaux d'altération sans cohésion et faiblement foisonnants de surface est estimée à ***3 m*** au maximum pour l'ensemble des secteurs concernés par l'aléa effondrement localisé.

10.1.3 Rappel des conclusions de l'étude préliminaire sur l'aléa effondrement localisé

Dans le cas du Bassin de Provence, les mécanismes retenus à l'origine d'instabilités susceptibles d'engendrer un effondrement localisé sont multiples :

- rupture du toit d'une galerie se répercutant jusqu'en surface : c'est le phénomène de « fontis » ;
- rupture de pilier(s) isolé(s) correspondant à un effondrement localisé (au sens strict) ;
- rupture des ouvrages débouchant au jour : puits et descenderies.

Effondrement localisé lié aux galeries

Un effondrement localisé en surface lié à une galerie est au départ causé par l'instabilité du toit de celle-ci. En effet, lorsque la voûte, initiée par la rupture du toit, ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs massifs au sein du recouvrement, elle se propage progressivement vers la surface. Si l'espace disponible au sein des vieux travaux est suffisant pour que les matériaux éboulés et foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le phénomène par « auto-comblement », la voûte peut atteindre la surface et engendrer un effondrement localisé (fontis) en surface.

Les observations, le retour d'expérience et les modélisations réalisées dans le cadre de l'étude préliminaire ont conduit à retenir un aléa de niveau ***faible à moyen*** pour les portions de galeries dont la profondeur n'excède pas 20 à 50 m suivant la section de la galerie. Ces niveaux résultent d'un croisement :

- d'une prédisposition évaluée à ***peu sensible à sensible*** selon que la galerie est été traitée ou non. Ces niveaux tiennent également compte de la qualité des terrains de recouvrement (calcaires du Fuvelien) et du peu d'événements recensés (même si le caractère souvent non urbanisé des terrains de surface à l'aplomb des travaux peu profonds explique probablement, en partie, le faible nombre de cas relatés) ;
- d'une intensité estimée sécuritairement à un niveau ***modéré*** (diamètre < 10 m) en l'absence de données précises sur le recouvrement des secteurs concernés et sur les dimensions des rares évènements recensés.

Effondrement localisé lié aux puits et descenderies

D'autres effondrements localisés trouvent leur origine dans la rupture des ouvrages de type puits ou descenderie. Ils se produisent souvent avec le vieillissement de leurs matériaux constitutifs :

- dans le cas des puits vides, la rupture de leur tête consiste en l'effondrement du revêtement et des terrains peu compétents environnants dans la colonne du puits vide. Dans le cas d'ouvrages remblayés, ces désordres font nécessairement suite au débourrage du puits, c'est-à-dire à l'écoulement du remblai par une recette du puits libérant un espace en tête de l'ouvrage ;
- au droit des descenderies d'accès. Selon l'inclinaison de la descenderie, le mécanisme à l'origine de l'effondrement localisé sera similaire à celui des puits ou des galeries (de type « fontis »).

Selon les données de traitement des puits fournis dans les DADT de CdF, 3 catégories ont été distinguées pour qualifier leur prédisposition à l'effondrement localisé.

- les puits non traités et demeurant ouverts. Il s'agit des puits hors concession situés le long de la galerie de la mer. Leur prédisposition a été qualifiée de ***sensible***.
- les puits remblayés mais ne comportant pas de bouchon béton. Dans cette configuration, tout effondrement localisé de la tête de puits nécessite l'écoulement préalable du remblai. Ce phénomène bien que peu probable ne peut être exclu. Par conséquent, la prédisposition à un aléa effondrement localisé pour ce type d'ouvrage a été qualifiée de ***peu sensible***. Il en est de même pour les puits recouverts d'une simple dalle, car ces puits récents sont massivement bétonnés et la probabilité de rupture du revêtement et par conséquent des terrains environnants apparaît réduite (Z et Morandat mais également Gérard).
- les puits traités comportant un bouchon autobloquant. Le traitement ayant rétabli la continuité physique des terrains, aucun aléa n'est à considérer à l'aplomb de ces ouvrages.

Pour les entrées des descenderies, 2 catégories ont été retenues :

- les entrées de descenderies traitées[4] par CdF et pour lesquelles la prédisposition à l'aléa effondrement localisé a été qualifiée de ***peu sensible***. En effet, les traitements réalisés ne permettent pas de certifier l'absence de vides résiduels à faible profondeur donc exclure totalement la survenue d'un aléa effondrement localisé ;
- les entrées de descenderies non traitées (descenderie non retrouvée) ou potentiellement traitées mais non confirmés dans les DADT de CdF (absence de recollement). Pour celles-ci, la prédisposition à l'aléa effondrement localisé a été qualifiée de ***sensible*** sur tout le tronçon potentiellement instable, à savoir les 20 premiers mètres.

En tenant compte d'une intensité évaluée, pour les mêmes raisons que précédemment, à un niveau ***modéré***, l'aléa effondrement localisé lié aux ouvrages débouchant au jour a été retenu à un niveau :

- ***moyen*** pour les puits non traités et demeurant ouverts ;
- ***faible*** pour les puits remblayés mais ne comportant pas de bouchon béton ;
- ***nul*** pour les puits traités comportant un bouchon autobloquant ;
- ***faible*** pour les entrées de descenderies traitées ;
- ***moyen*** pour les entrées de descenderies non traitées.

[4] Pour une descenderie totalement comblée, les 3 premiers mètres ont été dégagés et comblés par du béton. Pour une descenderie ouverte sur une longueur inférieure ou égale à 20 m, le vide existant a été totalement comblé par du béton. Pour une descenderie ouverte sur une longueur supérieure à 20 m, un bouchon béton a été placé à environ une dizaine de mètre de l'entrée.

Effondrement localisé lié aux exploitations

Un autre mécanisme initiateur d'un effondrement localisé en surface peut être la rupture isolée d'un ou de quelques piliers incapables de reprendre la charge qui s'applique sur eux. Ce type de rupture peut affecter des exploitations plus profondes que celles sensibles au risque de fontis. Si la manifestation en surface de la rupture d'un pilier isolé est généralement assez similaire à celle d'un fontis, les dimensions de la cuvette sont généralement plus étendues lorsque plusieurs petits piliers sont concernés.

Les observations, le retour d'expérience et les modélisations réalisées dans le cadre de l'étude préliminaire ont conduit à retenir un aléa de niveau *faible* pour les exploitations dont la profondeur n'excède pas 50 m. Ce niveau résulte d'un croisement d'une prédisposition évaluée, pour les mêmes raisons que pour le fontis, à *peu sensible* et d'une intensité, également, *modérée.*

Cas des zones de travaux « mal localisés »

Pratiquement, il s'agit des secteurs au voisinage proche des affleurements. Dans ces secteurs, sont recensés les premiers travaux souterrains artisanaux et désordonnés. Très peu d'informations concernant l'existence et la nature des travaux miniers ont été répertoriées. Seules des entrées de descenderies sont recensées mais dont l'exhaustivité n'est pas garantie. Dans les secteurs d'affleurements, la présence de travaux miniers à moins de 50 m de profondeur peut être suspectée.

Les guides méthodologiques proposent dans ce cas de figure (cas de travaux connus mais avec une localisation très mauvaise – la surface des travaux par rapport à la surface d'incertitude est très faible) de retenir une prédisposition *très peu sensible* à l'effondrement localisé. Par ailleurs, compte tenu de l'absence d'information sur l'extension de ces travaux, le niveau d'intensité est pris équivalent aux autres configurations à savoir *modéré*. En conséquence, l'aléa effondrement localisé sur ces zones potentiellement affectées par des travaux miniers est évalué à un niveau *faible*.

10.1.4 Apport des informations complémentaires et conclusion sur l'aléa effondrement localisé

Les informations complémentaires issues des archives consultées ou d'observations de terrain apportent des éléments permettant d'affiner l'évaluation de l'aléa effondrement localisé tant en niveau (cf. ci-après) qu'en cartographie (cf. § 13.1).

Galeries techniques

En ce qui concerne les galeries dites « techniques » (cf. § 6.1.1), l'apport des données sur leurs dimensions, mises en sécurité, etc. fournis dans les DADT ainsi que sur les investigations menés (galerie écoulement de Fuveau, cf. [14]) permet d'affiner leurs aléas tant en terme de niveau que de tracé. Le tableau suivant synthétise les modifications des aléas relatifs aux galeries techniques.

Commune	Nom galerie	Rôle	Aléa retenu (2009)	Type et année de travaux réalisés (source DADT)	Dimension / section (source DADT)	Recouvrement	Hauteur[5] de remontée de fontis (m) (cf. [11])	Analyse	Prédisposition	Intensité	Aléa retenu (2016)
Peypin	Galerie Catellane (8-201Y)	Ecoulement	Moyen	Galerie constatée effondrée	Lg = 0,7 m Hg= 0,8 m	Marno-calaire	3,5 m	Effondrement (entrée) + hauteur remontée très faible. Zone aléa supprimée	Nulle	Sans objet	Nul
Peypin	Galerie de la Doria (8-201X)	Ecoulement	Moyen	Cloison siphoïde en sortie pour permettre écoulement eau mais pas sortie de gaz	Lg = 0,7 m Hg= 0,7 m	Marno-calaire	3 m	Corps galerie vide dès l'entrée. Entrée maçonné. Hauteur de remontée de la galerie. Zone aléa maintenue à l'entrée de la galerie	Peu sensible	Limitée	Faible
Peypin	Galerie Trainage du terril (Puits Armand)	Trainage	Aucun	Galerie embouée	Lg = 2,65 m Hg= 2,2 m	Marno-calaire + Dépôt V079	-	Corps galerie emboué	Nulle	Sans objet	Nul
Peypin	Galerie Trainage des Termes (Puits Armand)	Trainage	Aucun	Galerie embouée	Lg = 2,65 m Hg= 2,2 m	Marno-calaire	-	Corps galerie emboué	Nulle	Sans objet	Nul
Peypin	Amorcière Puits Armand (8-257)	Amorcière	Aucun	Galerie embouée	Lg = 1,5 m Hg= 1,5 m	Marno-calaire	-	Corps galerie totalement emboué	Nulle	Sans objet	Nul
Peypin	Dynamitière Puits Armand (8-257)	Dynamitière	Aucun	Galerie embouée	Lg = 1,5 m Hg= 1,5 m	Marno-calaire	-	Corps galerie totalement emboué	Nulle	Sans objet	Nul
Peypin	Trainage Baume-de-Marron (Tronçon 1 – 8-252 et 8-253))	Trainage	Aucun	Galerie remblayée – Cendres-Bentonite	Section = 4 m²	Marno-calaire	-	Corps galerie remblayé	Nulle	Sans objet	Nul
Peypin	Trainage Baume-de-Marron (Tronçon 2 – 8-254 – 8-255)	Trainage	Aucun	Galerie remblayée – Cendres-Bentonite	Section = 4 m²	Marno-calaire	-	Corps galerie remblayé	Nulle	Sans objet	Nul
Peypin	Trainage Valdonne (Tronçon Nord – 8-259 – 8-236)	Trainage	Aucun	Galerie remblayée – Cendres-Bentonite	Section = 4 m²	Marno-calaire	-	Corps galerie remblayé	Nulle	Sans objet	Nul
Peypin	Trainage Baume-	Trainage	Aucun	Galerie remblayée	Section = 4	Marno-calaire	-	Corps galerie	Nulle	Sans objet	Nul

[5] Hauteur au-delà de laquelle la remontée de cloche de fontis n'atteint pas la surface (autocomblement atteint). Cette hauteur est modélisée par un calcul volumétrique prenant en compte en particulier les caractéristiques géométriques des cavités résiduelles (Vg), le coefficient de foisonnement (k) et l'angle de talus naturel des terrains constituant le recouvrement.

Commune	Nom galerie	Rôle	Aléa retenu (2009)	Type et année de travaux réalisés (source DADT)	Dimension / section (source DADT)	Recouvrement	Hauteur[5] de remontée de fontis (m) (cf. [11])	Analyse	Prédisposition	Intensité	Aléa retenu (2016)
	de-Marron (Tronçon 2 – 8-235 – 8-234)			– Cendres-Bentonite	m²			remblayé			
La Bouilladisse	Galerie du Pradel (12-40 G)	Ecoulement	Moyen	Ouverte	Lg = 0,5 m Hg= 0,7 m	Marno-calaire	3 m	Corps galerie vide dès l'entrée. Hauteur de remontée de la galerie. Zone aléa maintenue à l'entrée de la galerie	Peu sensible	Limitée	Faible
La Bouilladisse	Galerie de Pinchinnier (12-40K)	Ecoulement	Moyen	Fermée. Mur à 6 m de l'entrée	Lg = 1,8 m Hg= 2 m	Marno-calaire. Vallée ; possibilité de colluvions ou d'alluvions ancien ruisseau	25 m	Corps galerie à priori vide dès l'entrée. Aléa maintenu jusqu'à 25 m de profondeur : Zone d'aléa 2009 confirmée	Peu sensible à Sensible	Modérée	Moyen
La Bouilladisse	Galerie du puits du Soleil (12-40P)	Galerie technique	Aucun	Galerie remblayée	Lg = 0,6 m Hg= 1 m	Marno-calaire	-	Corps galerie remblayé	Nulle	Sans objet	Nul
Gardanne	Galerie Sainte-Baudille (4-329)	Ecoulement	Moyen	Effondrée ?	Lg = 0,6 m Hg= 1,2 m	Marno-calaire	20 m	Corps galerie supposé vide dès l'entrée. Zone aléa maintenue jusqu'à son débouché dans la galerie Saint-Pierre	Peu sensible à Sensible	Limitée	Faible
Gardanne	Galerie Saint-Pierre (4-328)	Roulage et Ecoulement	Moyen	Remblayage des 30 premiers mètres	Lg = 2,7 m Hg= 1,8 m	Marno-calaire	15 m	Corps galerie à priori vide après 30 premiers mètres. Zone d'aléa supprimée sur 30 premiers mètres puis maintenue jusqu'à 15 m de profondeur : Zone de 2009 réduite jusqu'à la cote + 245 m NGF	Peu sensible à Sensible	Modérée	Moyen
Gardanne	Galerie Biver/Gardanne	Roulage	Moyen	Fermée par bouchon de 19 m	Lg = 2,3 m Hg= 1,8 m	Marno-calaire + Terril Saint-Pierre	15 m	Corps galerie à priori vide après 19 premiers mètres Zone d'aléa supprimée sur 19 premiers mètres puis maintenue jusqu'à 15 m de profondeur : Zone de 2009 réduite jusqu'au	Peu sensible à Sensible	Modérée	Moyen

Commune	Nom galerie	Rôle	Aléa retenu (2009)	Type et année de travaux réalisés (source DADT)	Dimension / section (source DADT)	Recouvrement	Hauteur[5] de remontée de fontis (m) (cf. [11])	Analyse	Prédisposition	Intensité	Aléa retenu (2016)
								passage de la galerie sous la colline du terril Saint-Pierre			
Gardanne	Galerie du puits PHO	Galerie technique	Aucun	Murée	Lg = 1,5 m Hg= 2 m	Marno-calaire	25 m	Corps galerie a priori vide mais maçonné ou à revêtement béton ?. Aléa retenu sur toute longueur de la galerie	Peu sensible	Modérée	Faible
Gardanne	Mine Ecole	Enseignement	Aucun	Mine embouée	-	Marno-calaire	-	Corps mine totalement emboué	Nulle	Sans objet	Nul
Saint-Savournin	Amorcière Puits Saint-Germain	Amorcière	Aucun	Galerie embouée	Lg = 2 m Hg= 1,95 m	Marno-calaire	-	Corps galerie totalement emboué	Nulle	Sans objet	Nul
Saint-Savournin	Dynamitière Saint-Germain	Dynamitière	Aucun	Galerie embouée	Lg = 2 m Hg= 1,6 m	Marno-calaire	-	Corps galerie totalement emboué	Nulle	Sans objet	Nul
Saint-Savournin	Egout Puits Saint-Germain	Egout	Aucun	Galerie remblayée	Lg = 1,45 m Hg= 1,15 m	Marno-calaire	-	Corps galerie remblayé	Nulle	Sans objet	Nul
Trets	Galerie Saint-Jean (11-742)	Roulage et Ecoulement	Moyen	Embouée sur 602 m de long	Section = 4,5 m²	Marno-calaire	30 m	Corps galerie totalement emboué jusqu'à 40 m de profondeur. Zone aléa supprimée	Nulle	Sans objet	Nul
Trets	Galerie Desfarges (11-743)	Ecoulement	Moyen	En sortie pour permettre écoulement eau mais pas sortie de gaz	Lg = 1,3 m Hg= 2 m	Marno-calaire	25 m	Corps galerie à priori vide dès l'entrée. Aléa maintenu jusqu'à 25 m de profondeur : Zone de 2009 réduite jusqu'à la cote + 240 m NGF	Peu sensible à Sensible	Modérée	Moyen
Trets	Galerie Sainte-Marie (11-748)	Galerie technique double reliant les 2 puits Sainte-Marie	Faible	Fermé par béton lors du traitement puits Sainte-Marie	Lg = 1,3 m Hg= 2,15 m	Marno-calaire	25 m	Possibilité de vides résiduels dans galerie. Aléa maintenu sur toute longueur de la galerie double : Zone de 2009 réduite suite au calage du plan du carreau des puits	Peu sensible	Limitée	Faible

Commune	Nom galerie	Rôle	Aléa retenu (2009)	Type et année de travaux réalisés (source DADT)	Dimension / section (source DADT)	Recouvrement	Hauteur[5] de remontée de fontis (m) (cf. [11])	Analyse	Prédisposition	Intensité	Aléa retenu (2016)
Trets	Dynamitière Sainte-Marie (11-747)	Dynamitière	Faible	Transfert de responsabilité au propriétaire	Inconnu	Marno-calaire	-	Galerie supposée ouverte et vide. Aléa maintenu sur toute longueur de la galerie : Zone de 2009 réduite suite au calage du plan du carreau des puits	Peu sensible	Limitée	Faible
Trets	Recoupe descenderie Sainte-Marie	Galerie technique	Faible	Inconnu	Inconnu	Marno-calaire	-	Galerie supposée vide bien que descenderie remblayée. Aléa maintenu sur toute longueur de la galerie : Zone de 2009 réduite suite au calage du plan du carreau des puits	Peu sensible	Limitée	Faible
Marseille	Galerie de la Mer	Ecoulement	Moyen	Galerie accessible et surveillée	-	-	-	Zone d'aléa de 2009 maintenue	Peu sensible à Sensible	Modérée	Moyen

Tableau 6 : Caractéristiques de l'aléa effondrement localisé retenu à l'aplomb des galeries techniques recensées

Descenderies

En ce qui concerne les descenderies, l'apport des données sur leurs dimensions, mises en sécurité, etc. fournis dans les DADT ainsi que sur les investigations menés permet pour chaque descenderie :

- d'affiner l'emprise des aléas et, en considérant :
    - une réduction de l'incertitude de positionnement des descenderies levées par CdF de 10 m à 5 m (cf. § 7.2.1), et/ou ;
    - une réduction de la marge d'extension latérale du phénomène liée à la projection horizontale du tronçon de la descenderie évalué comme potentiellement instable à savoir les 10 premiers mètres, au lieu des 20 m pris dans le cadre de l'étude préliminaire de 2009. En effet, compte tenu de leur inclinaison, il est considéré que les descenderies présentent au-delà de 10 m de profondeur un toit résistant formé par les calcaires fuvéliens non altérés (cf. § 13.1). De plus, ceci tend à se confirmer par l'absence de désordre recensé à l'aplomb des corps de descenderies (cf. § 6.3).
- d'ajuster le niveau de l'aléa (faible ou moyen dans le cas présent et en conservant la méthodologie de l'étude préliminaire, cf. § 10.1.3) selon les données des DADT et non plus à partir des qualifications de traitement des ouvrages fournies dans les fichiers informatiques de CdF.

Puits

Après vérification dans les DADT des traitements réalisés, les niveaux d'aléa effondrement localisé retenus et leur cartographie réalisés dans le cadre l'étude préliminaire sont confirmés.

10.2 L'affaissement

10.2.1 Description du phénomène

L'affaissement se manifeste par un réajustement des terrains de surface induit par l'éboulement de cavités souterraines résultant de l'extraction du minerai. Les désordres, dont le caractère est généralement lent, progressif et souple, prennent la forme d'une dépression topographique qui présente une allure de cuvette (cf. figure 21), sans rupture cassante importante (des fractures ouvertes sont possibles dans la zone en extension, située sur la bordure de l'affaissement).

Les exploitations concernées par les affaissements possèdent généralement quatre points communs : exploitation dite « partielle » en plateure à faiblement pentée où des vides sur des superficies importantes ont été maintenus, grande profondeur (valeur dépendant du contexte mais en général une centaine de mètres au moins), extensions horizontales importantes (ratio largeur exploitée / profondeur) et recouvrement capable de se déformer de manière « souple » sur des amplitudes importantes.

L'amplitude maximale de l'affaissement est directement proportionnelle à l'ouverture des travaux souterrains. Le coefficient de proportionnalité dépend notamment de la profondeur des travaux, de la méthode d'exploitation (défruitement) et de traitement des vides (remblayage). Dans la majorité des cas, les amplitudes maximales observées sont d'ordre décimétrique à métrique.



Figure 21 : Photographie d'une cuvette d'affaissement Bray-en-Cinglais – Soumont (14)

Plusieurs configurations peuvent être à l'origine de ce phénomène :

- les exploitations totales (tout le minerai est enlevé dans les tailles), menées à moyenne ou grande profondeur et présentant des extensions horizontales importantes. Il se produit dans les cinq ans suivant l'arrêt de l'exploitation. Ce phénomène a été observé dans le cadre de l'exploitation du gisement du Bassin de Provence pour les secteurs exploités par tailles foudroyées ;
- Les exploitations partielles (chambres et piliers) présentant des configurations de profondeur, d'exploitation et de pendage favorables au déclenchement de ce type de phénomène (gisements pentés avec possibilité de débourrages de remblai, ou suffisamment profonds pour menacer la stabilité des piliers).

Sur le Bassin de Provence, l'analyse des écrits de l'effondrement du Rocher Bleu de 1879 en couche Grande Mine, qui s'est traduit par une remobilisation brutale de la surface du sol, a révélé que le mécanisme initiateur s'apparentait en fait à un affaissement, dont l'expression compte tenu de la rigidité de la structure s'est accompagnée de manifestations cassantes. Ce phénomène a été donc qualifié d'« affaissement à caractère cassant ».

10.2.2 Rappel des conclusions de l'étude préliminaire sur l'aléa affaissement

Compte tenu de l'étendue du bassin et des diversités de configuration, les travaux ont été regroupés en champs d'exploitations homogènes présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation permettant d'envisager une évolution identique (9 champs homogènes définies, cf. § 3). Pour chaque champ exploité par des méthodes partielles, des secteurs homogènes ont été définis en fonction du schéma de dimensionnement (taux de défruitement, taille et forme des piliers), du rapport L/H (largeur sur profondeur du panneau) et de la profondeur moyenne des travaux et regroupées en 22 « secteurs homogènes » dont le niveau d'aléa a été évalué ainsi que le caractère potentiellement cassant. Cette analyse a conclu à retenir :

- l'affaissement à caractère cassant lié à la rupture d'exploitations partielles critiques à sur-critiques (Largeur / Profondeur du panneau supérieur ou égal à 1) comprises entre 50 m et 250 à 300 m de profondeur, retenu à un niveau ***moyen***. La cartographie tient compte d'une marge d'incertitude de localisation des travaux de 10 m et d'un angle d'influence du phénomène de 10° ;
- l'affaissement à caractère souple lié à la rupture d'exploitations partielles critiques à sur-critiques (Largeur / Profondeur du panneau supérieur ou égal à 1) comprises entre 50 m et 250 à 300 m de profondeur, voir au-delà (selon les configurations de travaux), retenu à un niveau ***faible***. La cartographie tient compte d'une marge d'incertitude de localisation des travaux de 10 m et d'un angle d'influence du phénomène compris entre 20° et 35° suivant la nature géologique du recouvrement (générant cartographiquement une auréole autour des zones d'affaissement cassant dans le cas où ce dernier est également possible).

10.2.3 Apport des informations complémentaires et conclusion sur l'aléa affaissement

À ce stade, les éléments informatifs ayant permis d'évaluer et de cartographier les aléas affaissement correspondaient aux données issues des dossiers de CdF produites à l'échelle du bassin. À la demande de la DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur, un important travail de réflexion sur les mécanismes et phénomènes d'affaissement a été réalisé. Cette étude spécifique (cf.[5]) a débuté par un travail de recherche d'informations auprès des différentes sources d'archives disponibles, et par le recalage et la digitalisation partielle des plans sources. Leur analyse a permis de proposer une réévaluation de l'aléa affaissement en fonction de ces nouvelles informations (iso-profondeur, configuration des exploitations, géologie de recouvrement, etc.) qui ont pu être établies. Elle définit par ailleurs les autres types de phénomènes d'affaissement redoutés dans ces zones et leur niveau d'aléa correspondant.

Pour ce faire, des zones « homogènes » d'exploitation ont été découpées à partir de ces plans sources (couches Grande Mine et 4 Pans) pour évaluer les configurations de rupture au fond, basées sur des critères identiques (piliers barrières, zones vierges, panneaux exploités, méthode d'exploitation, largeur de panneau). Sur la base des 22 secteurs homogènes définis sur les exploitations partielles dans le cadre de l'étude préliminaire, plus de 1400 zones ou sous-secteurs homogènes ont été identifiés.

En fonction de ces « zones homogènes », une réévaluation des phénomènes et de l'aléa d'affaissement a pu être menée en intégrant d'une part, des critères complémentaires (criticité des panneaux, amplitude d'affaissement, valeurs de mise en pente, angles d'influence) et, d'autre part, des critères caractérisant les autres couches exploitées. D'autres éléments ont été finalement pris en compte dans l'analyse ; la nature et un critère de raideur des terrains de recouvrement ainsi que les volumes de vides localement créés au sein de celui-ci par les carrières de Pierres à ciment.

Ainsi, à l'issue de cette nouvelle démarche, il ressort que l'aléa relatif aux deux phénomènes d'affaissement a pu être précisé sur l'ensemble du bassin, tant en cartographie qu'en termes de niveaux (cf. figure 22). L'emprise des zones exposées à l'aléa affaissement a été réduite par rapport à l'étude préliminaire. En particulier, l'aléa affaissement à caractère cassant de niveau ***moyen*** :

- est confirmé en partie nord et en partie centrale du bassin, ainsi qu'au droit des quartiers peu profonds en partie nord du Lambeau Charrié où la démarche en zones « homogènes » a montré la présence de grands quartiers de chambres et piliers abandonnés présentant un fort taux de défruitement. Le zonage est néanmoins réduit en superficie par la présence de zones vierges qui délimitent des secteurs sous-critiques. Le secteur de Rocher Bleu, déjà effondré, a été quant à lui déclassé en *aléa affaissement à caractère souple de niveau faible à pente très limitée* (0,2 % < pente < 0,8 %) ;
- est supprimé entre les affleurements et la limite des premiers travaux cartographiés. Sur cette zone, les rares informations répertoriées relatives aux exploitations menées renvoient plutôt à la notion de « zones potentiellement affectées par des travaux miniers » aux mouvements attendus de très faibles amplitudes ;
- est supprimé dans la partie sud (Saint-Savournin Sud, Cadolive et Peypin) où se situent par ailleurs les enjeux actuels les plus importants. Dans ces secteurs, l'étude a permis d'exclure le phénomène d'affaissement à caractère cassant de la présence systématique des exploitations sus-jacentes à Grande Mine en couches Quatre Pans et Gros Rocher, et localement de Pierres à ciment. Il a été reclassé en aléa affaissement à caractère souple de niveau faible à moyen ;
- est supprimé au droit des quartiers peu profonds de Baume de Marron, La Bouilladisse, Pinchinier et Trets, peu étendus, présentant des exploitations par tailles remblayées et/ou découpées par des failles avec un pendage marqué. Il a été reclassé en aléa affaissement à caractère souple de niveau faible à moyen.

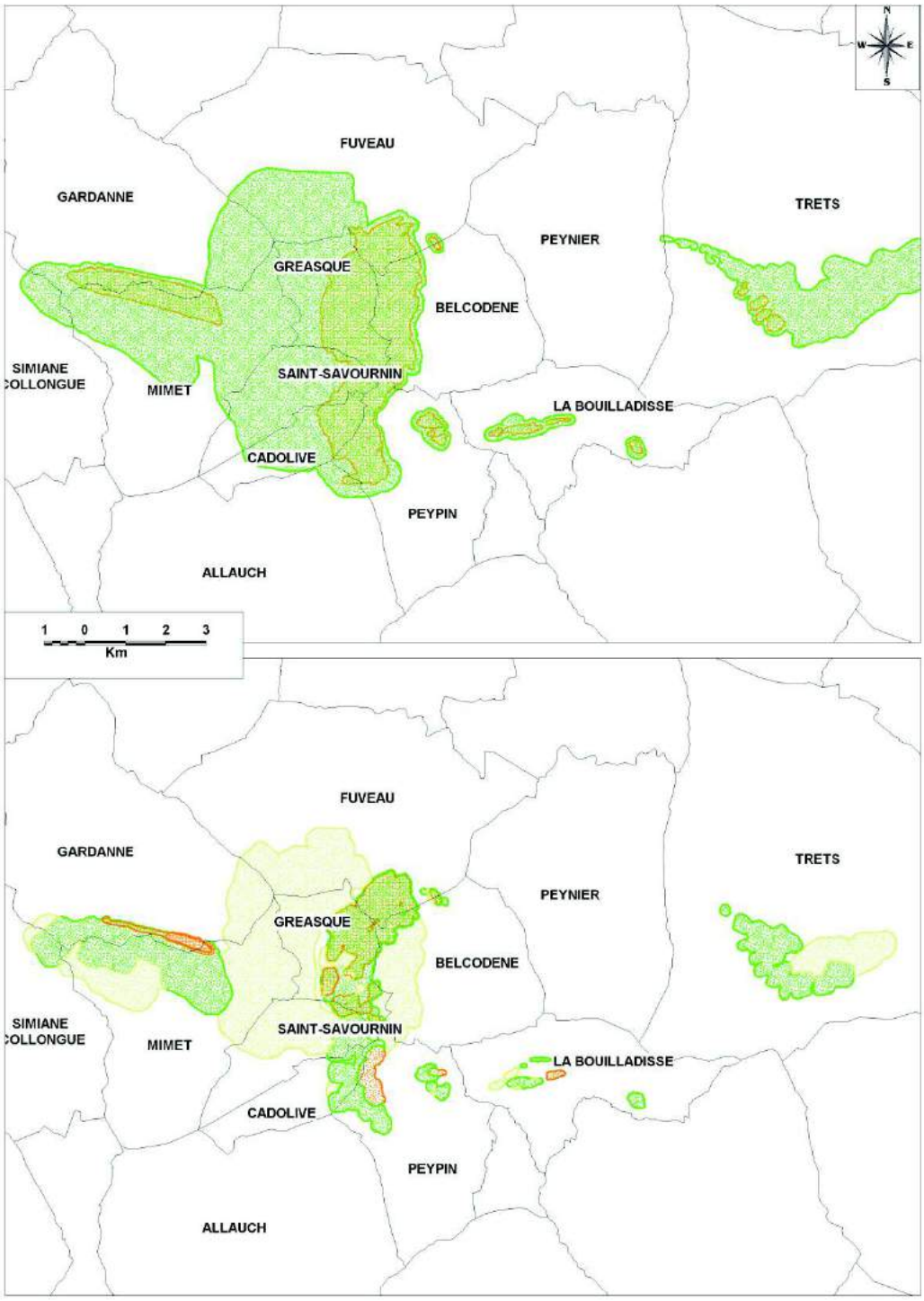


Figure 22 : Cartographie de l'aléa affaissement sur le bassin de Provence (en haut : édition de 2009 - en bas : édition de 2015)

Orange quadrillé = affaissement cassant moyen ; orange = affaissement souple moyen ; vert = affaissement souple faible ; jaune = aléa faible à pente très limitée (0,2 % < pente < 0,8 %)

10.3 Le glissement

10.3.1 Description du phénomène

Des stériles d'exploitation (francs ou de sélectivité) ont été mis en dépôt sous forme de verses ou de terrils. Tout dépôt peut *a priori* être sujet à des phénomènes de glissements de leurs flancs (ou de tassements).

Deux grands types de phénomènes de glissements sont distingués.

Les glissements superficiels sont des phénomènes ponctuels mettant en jeu des volumes restreints de matériaux (quelques dizaines de m^3). Ils prennent principalement la forme de glissements pelliculaires ou de rigoles de ravinement, parfois profondes, avec pour conséquence l'épandage de matériaux en pied de dépôt. Le développement de ces instabilités superficielles peut favoriser le déclenchement d'une rupture de plus grande ampleur.

Les glissements profonds résultent du mouvement d'une masse de terrain le long d'une surface de rupture (circulaire, plane ou quelconque) et dont la vitesse de déplacement, en phase critique, varie fréquemment de quelques millimètres à quelques mètres par heure. Les volumes concernés peuvent s'avérer importants et se répandre vers l'aval sous forme de cônes d'épandage.

Ces phénomènes de glissements, qu'ils soient superficiels ou profonds, sont généralement la conséquence d'une mauvaise gestion des eaux (à l'intérieur et à proximité des dépôts), d'hétérogénéités granulométriques, de défauts de géométrie des pentes et/ou encore d'emprunts (érosion ou anthropiques).

10.3.2 Rappel des conclusions de l'étude préliminaire sur l'aléa glissement

Les études réalisées dans le cadre des dossiers d'arrêt définitif de travaux (DADT) de CdF ont révélé que la stabilité en grand de tous les terrils était assurée. Les phénomènes potentiels seraient donc assimilables à des glissements superficiels dont l'intensité estimée est ***limitée*** à l'exception du terril de Molx (intensité ***modérée***) en raison de sa forte pente et de l'absence d'aménagement. Néanmoins, ce dernier composé d'éléments grossiers (granulométrie décimétrique) à bonne cohésion est peu sensible à produire des phénomènes de glissement. Au final, tous les ouvrages de dépôt, y compris le Molx sont affectés d'un aléa glissement de niveau ***faible***.

Certaines verses (ou terrils) répertoriées ne sont pas renseignées dans le DADT et ne sont pas visibles sur site. Par conséquent, elles sont supposées être de faible importance et l'intensité de l'aléa glissement de terrain éventuel ne saurait être qu'au plus ***limitée***. Dans ces conditions, l'aléa « glissement de terrain » a été qualifié de ***faible*** au droit de ces verses ou terrils (les terrils Notre Dame n°1 et 2, le terril Rouvrières, le terril Doria, le terril Lecas, le terril Cerveau, les deux terrils du puits Armand, les terrils de faible importances (communes de Gréasque et Belcodène), le terril de Trets, les anciens terrils de la Bouilladisse).

Le tableau 7 suivant synthétise les éléments d'observations et les conclusions sur l'aléa glissement retenu pour chaque terril dans le cadre de l'étude préliminaire.

Nom	Description	Prédisposition	Intensité	Aléa
Défends	Aménagements réalisés, adoucissement des pentes, talutage. Des banquettes drainantes et des contre-pentes ont été aménagées. Maîtrise du schéma des écoulements.	peu sensible	Très limitée	**Faible**
Grappon	remodelage des profils et la réalisation de banquettes drainantes conduisant les eaux de ruissellement jusqu'à une série de bassin d'orage.	sensible	Très limitée	**Faible**
Madame d'André	Les pentes du terril de faible hauteur sont entièrement boisées et ne posent pas de problème particulier de stabilité.	Peu sensible à sensible	Limitée	**Faible**
Sauvaires	Aucun désordre profond lié à des problèmes géotechniques n'a été observé. Des aménagements récents ont été réalisés	Très peu sensible	Très limitée	**Faible**
Bramefan	• le terril du Bramefan, édifié avec des pentes faibles (15° en final), n'a jamais donné lieu au moindre problème de stabilité ; • la pente en pied de dépôt est réglée de telle manière qu'on n'observe pas d'accumulation d'eau ; • la cohésion du corps du terril est assurée par la prise rapide des cendres.	Très peu sensible	Très limitée	**Faible**
St-Pierre	Chemin d'écoulement partiellement obturé, glissement flagrant	Sensible	Limitée	**Faible**
Molx	Pente forte, terril non aménagé, cependant cohésion acquise	Peu sensible	Modérée	**Faible**
PHO	Ce terril pas très haut présente sur certains flancs des signes de glissements superficiels	sensible	Limité	**Faible**
Terril du puits Germain	Ce terril qui a subi une combustion totale, présente des pentes végétalisées. Aucun signe d'instabilités n'a été décelé.	Peu sensible	Limité	**Faible**
Puits Biver	Terril non aménagé présentant des signes d'instabilité (un glissement détecté) et des flancs très raides. Le corps de ce terril doit certainement avoir acquis une cohésion	Sensible	limitée	**Faible**
Terril du puits Léonie	Terril du puits Léonie, végétalisé, présente des pentes assez raide mais pas de signes d'instabilité détecté.	Peu sensible à Sensible	Limité	**Faible**
Puits Gérard	Terril totalement végétalisé, difficilement reconnaissable	Peu sensible	Très limité	**Faible**
Pâté	Terril stabilisé, végétalisé	Peu sensible	Très limité	**Faible**
Dépôt entrée galerie St Pierre	Dépôt probablement de faible importance.	Peu sensible	Très limité	**Faible**
Près neufs	Reconverti en zone industrielle est actuellement probablement non visible.	**Pas d'aléa**		
Félicie	Extension de 1,6 ha, carreau du puits de la Félicie.	Peu sensible	Très limité	**Faible**
Carreau de Meyreuil	Terril de faible importance, supposé non sujet au glissement de pente.	**Pas d'aléa**		
Armand	Terril pas très haut, ne présentant pas d'indices d'instabilité	peu sensible	Très limité	**Faible**
Baume de Marron	Terril se confondant dans le paysage, ne présentant pas de signe d'instabilité.	peu sensible	Très limité	**Faible**
Terril de l'Huillier	Ce terril n'est que partiellement végétalisé, néanmoins les pentes y sont douces et ne présentent aucun signe d'instabilité.	peu sensible	Très limité	**Faible**
Terril du puits n°12	Terril végétalisé et stabilisé	Peu sensible	Très limité	**Faible**
Terril de la RN96	Terril végétalisé et stabilisé	Peu sensible	Très limité	**Faible**
Terril du puits 14	Terril végétalisé et stabilisé	Peu sensible	Très limité	**Faible**
Terrils du puits 15	Terril végétalisé et stabilisé	Peu sensible	Très limité	**Faible**
Notre Dame n°1	Terrils au sujet desquels on ne dispose d'aucune information (cf. remarque paragraphe précédent).	Peu sensible à sensible	Très limité	**Faible**
Notre Dame n°2		Peu sensible à sensible	Très limité	**Faible**
Rouvrières		Peu sensible à sensible	Très limité	**Faible**
Doria		Peu sensible à sensible	Très limité	**Faible**
Lecas		Peu sensible à sensible	Très limité	**Faible**
Cerveau		Peu sensible à sensible	Très limité	**Faible**
Les deux terrils du puits Armand		Peu sensible à sensible	Très limité	**Faible**
Terrils de faibles importances (communes de Gréasque et Belcodène)		Peu sensible à sensible	Très limité	**Faible**
Le terril de Trets		Peu sensible à sensible	Très limité	**Faible**
Anciens terrils de la Bouilladisse		Peu sensible à sensible	Très limité	**Faible**

Tableau 7 : Qualification de l'aléa glissement sur les terrils du Bassin de Provence dans le cadre de l'étude préliminaire (cf. [1])

10.3.3 Apport des informations complémentaires et conclusion sur l'aléa glissement

Les récents éléments d'observations (glissement superficiel constaté sur le terril du Grappon, cf. § 6.2) et les rapports de la surveillance menée par l'Etat confirment le zonage de l'aléa glissement retenu en 2009.

10.4 Le tassement

Sur le Bassin de Provence, le phénomène de tassement ne concerne que les terrains remaniés de surface, à savoir les dépôts de surface.

Parmi les principaux facteurs classiques de prédisposition aux tassements de remblais anthropiques, sont retenus :

- l'épaisseur des remblais ;
- la nature et la granulométrie des matériaux déposés ;
- la méthode de mise en place des remblais (avec ou sans compactage).

La mise en place des dépôts a été assurée par simple déversement gravitaire. Ceci ne garantit donc pas une compaction complète. Au droit de chaque terril, la prédisposition à un aléa de type tassement a été qualifiée de ***peu sensible*** car la plupart d'entre eux ont acquis une certaine cohésion qui confère à l'édifice une capacité non négligeable de supporter une surcharge. De par leur nature, ces phénomènes présentent une intensité ***limitée***. Le croisement de la prédisposition et de l'intensité du phénomène attendu conduit à retenir un aléa tassement ***faible*** au droit de chaque terril.

A l'image de l'aléa glissement, les récents éléments d'observations confirment le zonage de l'aléa tassement retenu en 2009.

11 EVALUATION DE L'ALEA ECHAUFFEMENT

Il s'agit d'un phénomène engendré par l'oxydation de la matière organique combustible. La combustion spontanée est due à une réaction exothermique comme l'oxydation de la pyrite ou un feu externe (type feu de broussailles).

Sur le Bassin de Provence, on peut considérer que tous les dépôts ayant dû brûler se sont déjà consumés ou qu'ils sont en cours de combustion : Terrils de Sauvaires et Défens. Pour ces deux dépôts un aléa ***moyen*** est retenu.

Par ailleurs, les couches exposées naturellement à l'affleurement sont déjà oxydées et une mise à feu n'est envisageable qu'en cas d'incendie de surface, ou de travaux de terrassement dégageant des horizons non encore oxydés.

Dans le cadre de l'étude préliminaire de 2009, il a été considéré un aléa échauffement de niveau ***faible*** sur l'ensemble des affleurements avec ou sans présence de travaux miniers et dont les tracés étaient issus des fichiers informatiques de CdF.

Bien que ces affleurements soient naturellement en place, la présence de travaux miniers peut catalyser et aggraver le phénomène. C'est pourquoi, un aléa ***faible*** est nouvellement retenu uniquement sur les zones d'affleurements où la présence de travaux miniers est avérée ou supposée. En cas d'absence de travaux miniers (cas de la couche Gréasque sur environ 2 km linéaires au centre de la commune de Peynier), l'aléa échauffement a été supprimé mais la possibilité de développement d'incendies au niveau de cet affleurement de lignite est à garder en mémoire.

Par ailleurs, l'exploitation des plans miniers sources du quartier de La Bouilladisse a permis de mettre en évidence l'existence d'affleurements de la couche dite de « Fuveau » qui ont fait l'objet d'exploitations très anciennes. Le tracé des affleurements des autres couches exploitées de ce quartier (Grande Mine, 4 Pans, Gros Rocher et 2 Pans) a été également précisé et complété. Tous ces affleurements ont été retenus en aléa échauffement de niveau ***faible***.

12 EVALUATION DE L'ALEA INONDATION

12.1.1 Description des phénomènes

Selon le guide méthodologique (cf. [3]), les phénomènes liés à l'ancienne activité minière qui peuvent être à l'origine d'inondations sont multiples :

- la modification du régime des émergences ;
- l'apparition de zones détrempées ou de marécages ;
- l'inondation des sous-sols et des points bas ;
- la modification du régime des cours d'eau ;
- les inondations « brutales » ;

Dans le cas du Bassin de Provence, la configuration des travaux miniers souterrains et des dépôts de surface amènent à retenir deux de ces phénomènes :

- la modification du régime des émergences dans le cas d'un colmatage accidentel de la galerie de la Mer et ainsi l'apparition ou l'augmentation de débits d'écoulements au puits Z et par les galeries Saint-Pierre/Saint-Baudille, galerie de Gardanne Biver et galerie de Fuveau.
- une inondation « brutale » par l'apport conséquent d'eau dans les dispositifs de drainage et collecte des eaux des terrils hydrologiquement les plus sensibles à savoir les terrils de Grappon, Défens, Sauvaires et Madame d'André.

12.1.2 Rappel des conclusions de l'étude préliminaire sur l'aléa inondation

Dans le cadre de l'étude préliminaire, l'aléa inondation n'a pas été traité. En effet, une des conclusions était que cet aléa, lié en particulier aux dépôts (terrils, verses), ne pouvait être traité de manière globale mais qu'il nécessitait la réalisation d'études spécifiques localisées.

Néanmoins, une recommandation de suivi des aménagements hydrauliques des terrils pour garantir la pérennité des dépôts ou pour limiter leur impact à l'aval, notamment sur les phénomènes d'inondation a été formulée.

En 2014, la DREAL a sollicité Geoderis, dans le cadre de l'étude détaillée des aléas, pour la précision et la finalisation de l'aléa inondation (cf. [6]).

12.1.3 Synthèse de l'aléa inondation

Remarques préalables : la mise en œuvre des études de détail fait apparaître la limite des études d'aléas miniers pour appréhender la problématique d'inondation. En effet, l'impact des terrils sur le réseau hydrographique en aval implique une connaissance de nombreux paramètres extérieurs (données relatives aux réseaux, aux crues des bassins versants plus ou moins urbanisés, à la topographie, etc.), dont l'étude dépasse largement le cadre de l'aléa minier.

Par ailleurs, précisons qu'il n'y a pas eu d'imbrication avec les éléments PPRI durant la réalisation de ces études, l'objectif étant d'obtenir une cartographie de l'aléa spécifiquement minier.

12.1.3.1 Modification du régime des émergences

Dans l'hypothèse très improbable où la galerie de la Mer se colmaterait, le point bas susceptible de servir de point de débordement serait le Puits Z de la concession de Meyreuil (C2), via une galerie technique à + 216 m NGF relié au puits par une ouverture de 1,6 m de diamètre dans le bouchon de béton. Si les communications ne sont pas parfaites avec le puits Z, les mises en charge locales pourraient entrainer des débordements secondaires au droit des galeries suivantes :

- Saint-Pierre/Saint-Baudille à + 226 m NGF aménagée pour évacuer 400 m^3/h ;
- Gardanne Biver à + 229 m NGF, équipée pour évacuer 400 m^3/h ;
- Fuveau à + 230 m NGF, équipée pour évacuer 800 m^3/h.

De tels débordements ont été évalués à une prédisposition ***très peu sensible***, et les lames d'eau impliquées seraient d'intensité ***modérée*** (< 50 cm) pour le flux principale, et ***limitée*** en bordure (< 20 cm). L'aléa inondation relatif à la modification du régimes au niveau de ces quatre émergences a été évalué à ***faible***.

12.1.3.2 Inondation « brutale »

L'évaluation de l'aléa « inondation brutale » associé à un événement centennal, au sens du guide méthodologique, se base sur le croisement de :

- la prédisposition à l'inondation pour le site concerné, estimée par l'hydrogéologue après étude du dimensionnement (capacité de rétention et/ou d'évacuation) et de l'état des aménagements hydrauliques (colmatage, végétalisation, faiblesses structurelles), ainsi que de la fréquence de leur suivi. La prédisposition va de « peu sensible » à « très sensible » ;
- avec l'intensité, qui permet, une fois les points de débordement / mise en charge / retenue d'eau potentiels identifiés, de répartir le volume d'eau produit sur la topographie locale selon plusieurs classes. Les classes d'intensité vont de « limitée » à « très élevée ».

Le calcul des volumes d'eau produits en cas d'événement centennal se base sur des raisonnements d'hydrologie quantitative, avec l'aide des méthodes traditionnelles d'évaluation des débits de crue.

La détermination des points de débordement / mise en charge / retenue d'eau potentiels et l'estimation des volumes d'eau restant à évacuer est :

- quantitative, en calculant les débits disponibles des ouvrages de collecte et d'évacuation ainsi que les capacités de rétention des bassins[6] ;
- qualitative, en inspectant le réseau en détail, pour identifier les éventuels points où pourrait se produire un dysfonctionnement.

Les volumes centennaux à évacuer sont ensuite répartis sur la topographie environnant chaque site, et fournissent plusieurs classes d'intensité selon la hauteur d'eau évaluée qui résulte de cette répartition. L'utilisation de photographies aériennes / satellitaires et des courbes de niveau à pas de 5 m disponibles localement (données photogrammétriques CdF réalisées en 2005) a permis de préciser la localisation de certaines zones préférentielles d'écoulement ou certaines zones potentielles de débordement. Suite aux inspections de terrain la répartition des classes d'intensité a pu été retravaillée et affinée.

[6] Ces méthodes avaient déjà été utilisées par dans le cadre des études pour les DADT de CdF en utilisant les chroniques pluviométriques de la station de Marignane. Dans la nouvelle évaluation de l'aléa, ont été utilisées les données de la station d'Aix-en-Provence, plus proche du site d'étude.

A souligner que le croisement de la prédisposition et de l'intensité ne donne pas un niveau d'aléa de manière déterministe : l'évaluation de ce dernier est à l'appréciation de l'expert sur la base des éléments quantitatifs et qualitatifs dont il dispose.

Le tableau 8 suivant synthétise les différents phénomènes évalués, pour chaque terril, et par zone. Les intensités et prédispositions sont indiquées et expliquées, pour finalement aboutir sur les niveaux d'aléa retenus. Il en ressort que l'aléa inondation dite « brutal » a été évalué de *faible à fort* suivant les quatre terrils concernés.

Terril	Phénomène évalué	Paramètre critique	Zones concernées	Intensité en cas d'événement centennal	Détails sur la classe d'intensité	Prédisposition en cas d'événement centennal	Détails sur la prédisposition	Niveau d'Aléa
Grappon	Inondation brutale	Hauteur de lame d'eau	Chemin d'accès au terril / Surface du terril	Limitée	La hauteur de la lame d'eau est limitée (< 20 cm) sur le terril et le chemin d'accès.	Peu sensible	Un dysfonctionnement du réseau de collecte est envisageable, entraînant un débordement des fossés sur le terril et le chemin d'accès. Dégradé en plusieurs endroits, le réseau fait l'objet de travaux réguliers. Le suivi du BRGM-DPSM et les interventions réalisées permettent de limiter la prédisposition de cette zone à l'nondation à un niveau peu sensible.	Faible
			Aval du bassin dessableur	De modérée à limitée	La hauteur de la lame d'eau est modérée (20 à 50 cm) dans l'axe principal d'écoulement, puis diminue selon la topographie en s'en écartant, jusqu'à devenir limitée (< 20 cm). Par croisement avec la prédisposition, le niveau d'aléa résultant est partout faible.	Peu sensible	Une étude récente a montré que les ouvrages avals semblent correctement dimensionnés pour évacuer le débit de fuite provenant du bassin écrêteur. Le bassin aval est très endommagé mais le bassin amont est considéré hydrauliquement suffisant. Une obstruction de l'exutoire aval étant toutefois toujours possible, la prédisposition à l'inondation est considérée comme peu sensible.	Faible
Defens	Inondation brutale	Hauteur de lame d'eau	Pistes traversant le terril / Surface du terril	Limitée	La hauteur de la lame d'eau est limitée (< 20 cm) sur le terril et les différentes pistes qui le traversent.	Sensible	Un dysfonctionnement du réseau de collecte est probable, entraînant un débordement des fossés sur le terril et les pistes qui le traversent. Dégragé et partiellement obturé en plusieurs endroits, le réseau ne fait visiblement pas l'objet de travaux de nettoyage ni de remise en l'état, malgré le suivi DPSM régulier. La prédisposition de cette zone à l'inondation est donc considérée comme sensible.	Faible
			Aval du bassin de rétention Ouest.	Limitée	La hauteur de la lame d'eau est limitée (< 20 cm) sur le chemin d'accès au terril en aval immédiat du bassin Ouest, grâce à la présence du ruisseau sur sa bordure est, dont les capacités d'écoulement sont suffisantes pour évacuer les eaux de débordement.	Sensible	Le bassin Ouest en grande partie comblé et végétalisé, il est donc probable qu'il déborde vers le chemin d'accès. La prédisposition de la zone à l'inondation est par conséquent sensible.	Faible
			Aval de la déchetterie en contrebas du bassin de rétention Est	De modérée à limitée	En aval de la déchetterie au nord-est du terril, la hauteur de la lame d'eau est limitée (20 à 50 cm) dans l'axe principal d'écoulement qui contourne l'habitation. En s'en écartant , elle diminue selon la topographie jusqu'à devenir limitée (< 20 cm). Les eaux s'écoulent jusqu'à rejoindre le vallat de Valbrillant en contrebas.	Sensible	En aval du canal partant du bassin Est et allant jusqu'au niveau d'une déchetterie, les ouvrages sont endommagés, végétalisés, et souvent partiellement obturés : dans cet état, ils ne pourront probablement pas évacuer le débit de fuite du bassin Est sans déborder. La prédisposition de la zone à l'inondation est donc considérée comme sensible. GEODERIS signale par ailleurs une importante érosion du sol (plusieurs dizaines de centimètres) sous la chaussée de la route menant à la déchetterie. GEODERIS reporte également la présence d'un arbre dans le bassin Est : il pourrait percer la membrane étanche de ce dernier.	De moyen à faible
Sauvaires	Inondation brutale	Hauteur de lame d'eau	Terril et chemin qui en fait le tour, ainsi que la route en contrebas	Limitée	La hauteur de la lame d'eau est limitée (< 20 cm) sur le terril et le chemin qui en fait le tour. Les eaux s'écoulant de chaque côté du terril se rejoignent au niveau de la route à l'aval, mais débordent en grande partie vers un large thalweg grâce à une descente d'eau réalisée à cet effet : la lame d'eau s'écoulant sur la route garde donc une hauteur limitée (< 20 cm).	Sensible	Un dysfonctionnement du réseau de collecte est probable, entraînant un débordement des fossés sur le terril et le chemin qui en fait le tour. Les traces de ravinement sont nombreuses sur le chemin et la route aval. Le réseau est dégradé et partiellement obturé en plusieurs endroits. Certains caniveaux sont mal raccordés et/ou obturés de barbelés. Des travaux sur le réseau sont réalisés par endroits, par l'exploitant de panneaux photovoltaïques installé sur le site. Cette zone présente une prédisposition sensible à l'inondation.	Faible
			Amont du terril où ce dernier fait office de barrage aux eaux du vallon principal à l'est	De très élevée à limitée	La hauteur de la lame d'eau retenue est très importante (plusieurs mètres) dans la zone la plus basse de chaque vallon, puis diminue en s'en éloignant, suivant la topographie (très pentue sur les flancs à l'est, moins marquée à l'ouest), jusqu'à devenir limitée (< 20 cm).	Sensible	Une station de pompage est installée dans un bassin de récupération de eaux du vallon principal, relève les eaux de 40 m puis les déverse sur le flanc Est du terril. Elle fonctionne correctement et est régulièrement suivie par le BRGM-DPSM, mais en l'absence de données de pompage détaillées, on considérera de manière sécuritaire que le dépassement de la capacité de stockage du bassin reste probable en cas de dysfonctionnement de la station. La prédisposition à l'inondation est donc considérée comme sensible dans cette zone.	De fort à faible
			Amont du terril où ce dernier fait office de barrage aux eaux du petit vallon à l'ouest			Très sensible	Il n'existe pas de dispositif d'évacuation des eaux du petit vallon ouest : les eaux s'accumulent dans une zone broussailleuse et s'évacuent lentement par percolation et évaporation. La prédisposition à l'inondation est donc très sensible dans cette zone.	
Mme D'André	Inondation brutale	Hauteur de lame d'eau	Surface du terril	Limitée	La hauteur de la lame d'eau est limitée (< 20 cm) sur le terril.	Peu sensible	Un dysfonctionnement du réseau de collecte est envisageable, entraînant un débordement des fossés sur le terril. Les caniveaux sont en bon état mais leur importante végétalisation peu poser problème. La prédisposition de cette zone à l'inondation est considérée comme peu sensible, le site étant par ailleurs suivi régulièrement par le BRGM-DPSM.	Faible
			Amont du bassin relié à l'entrée de la galerie sous terril	D'élevée à limitée	La hauteur de la lame d'eau est élevée (> 50 cm) à proximité immédiate du lit du ruisseau et du bassin. Le débordement du lit vers le sud et sur la route génère une hauteur d'eau d'abord moyenne (20 à 50 cm) puis limitée (< 20 cm). La faible section d'écoulement disponible sous le pont limitera fortement le reflux d'eau vers l'amont par la partie busée. En revanche l'eau ayant débordé depuis l'aval se déversera partiellement dans le lit amont.	Sensible	Une obstruction partielle de la prise amont de la galerie est envisageable, mais non probable. Le bassin amont est en bon état. Le BRGM-DPSM suspecte en revanche un écrasement partiel de la galerie qui pourrait générer une mise en charge supplémentaire de la prise amont. Un débordement conjoint du lit et du bassin est donc à prévoir en aval du passage busé en direction du sud et sur la route. GEODERIS attribue à cette zone une prédisposition sensible à l'inondation.	De fort à faible
			Aval du barrage formé par l'ancienne voie SNCF	D'élevée à limitée	En situation d'effacement progressif du barrage, la hauteur de la lame d'eau générée en aval est élevée (> 50 cm) et diminue en s'en éloignant suivant la topographie. L'incertitude sur la zone d'effacement potentielle nécessite de considérer un zonage large pour être sécuritaire, ce qui génère un aléa moyen puis faible par croisement avec la prédisposition. L'arrivée du flux d'eau au ruisseau du Pacaret écrête et étale le flux d'eau principal sur une zone élargie, avec une hauteur qui devient moyenne (20 à 50 cm) au centre et limitée en s'en éloignant (< 20 cm). Un débordement localisé d'intensité limitée du Pacaret est également à prévoir en aval immédiat de la confluence avec l'Audibert canalisé. Par croisement avec la prédisposition, l'aléa résultant est partout faible en aval de la confluence.	Peu sensible	La rupture totale du barrage formé par l'ancienne voie SNCF semble extrêmement improbable, en revanche un effacement progressif accompagné de percolation n'est pas à exclure (des percolations ont déjà été observées). Le DPSM surveille régulièrement le site, et des essais géotechniques sont au programme mais n'ont pas encore été planifiés. Des préconisations ont notamment été faites par courrier pour renforcer le suivi du fonctionnement du bassin, et pour effectuer un diagnostic de la digue. En fonctionnement normal, sans incident au niveau de la digue, les débits récupérés en aval du système sont plus faibles que ce qu'ils devraient être à l'état naturel, du fait de la présence du terril et de ses aménagements : bien que des débordements du ruisseau puissent se produire en contrebas du barrage, ils ne sont donc pas d'origine minière. Finalement, la prédisposition à l'inondation de la zone en aval du barrage porte donc uniquement sur les désordres pouvant apparaître sur ce dernier, et est considérée comme peu sensible.	De moyen à faible

Tableau 8 : Synthèse de l'aléa « inondation brutale » pour les quatre terrils étudiés

13 CARTOGRAPHIE DES ALEAS

Le fond utilisé pour le report cartographique est la BDORTHO® de l'IGN, correspondant à la photographie aérienne informatisée (ici prise de vue de 2011), orthorectifiée et géoréférencée de la zone d'étude. On considère généralement une incertitude de 3 m pour l'utilisation de la BDORTHO® de l'IGN comme fond topographique.

Les marges d'influence et d'incertitude liées à l'extension de l'aléa, et à la précision des levés et des reports cartographiques tels que définies dans les paragraphes respectifs de chaque aléa sont intégrées aux zonages figurés sur la carte.

Il est important de noter que la marge d'incertitude peut-être tronquée ou variable selon la direction cardinale impactant de fait la cartographie des aléas. En effet, la présence d'un repère topographique précis permet parfois d'estimer sans ambigüité la position de l'ouvrage (par exemple, certitude que l'ouvrage se situe en rive droite d'une rivière ou de tel côté d'une route, d'après les documents d'archives, mais position incertaine par ailleurs). Par ailleurs, certains ouvrages repérés sur plans ou mentionnés dans les archives peuvent présenter une cote « z » ou altimétrique. Cette donnée confère à ces ouvrages, lorsqu'ils ne sont pas retrouvés sur le terrain, une incertitude de localisation plus faible dans la direction de la ligne de plus grande pente et une incertitude plus élevée dans la direction de la ligne de niveau correspondant à la cote connue de l'ouvrage.

Les cartes relatives aux aléas retenus sont présentées en annexe 5. Pour les mêmes raisons que pour les cartes informatives (cf. § 7), l'impression des cartes d'aléas par commune a été réalisée à l'échelle du 1/10 000. Néanmoins, compte tenu de la précision des échelles des supports cartographiques utilisés, il est estimé que l'échelle maximale de validité des cartes d'aléas est celle du 1/2 500.

13.1 Cartographie de l'aléa effondrement localisé

Pour les puits, la zone d'aléa est circulaire. Le rayon de la zone d'aléa est défini à partir du centre du puits de la façon suivante (cf. figure 23) :

$$R = R_{puits} + R_{influence} + R_{incertitude\ globale\ de\ localisation}$$

Avec :

- R_{puits} (estimé à 1,5 m lorsqu'il n'est pas connu car il ne s'agit pas de puits principaux) ;
- $R_{influence}$, relatif à l'extension latérale du cône d'effondrement, pris égal à 3 m, correspondant à l'épaisseur des terrains très peu cohésifs de surface et d'un angle de talus de 45° ;
- $R_{incertitude\ globale\ de\ localisation}$ est estimée de 8 à 13 m, selon :
    - Ouvrage « visible » dans les DADT de CdF : 8 m, dus à la valeur de 5 m liée à la confirmation terrain des levés CdF (cf. § 7.2.1) et à l'incertitude du report sur la BD ORTHO® de l'IGN (3 m) ;
    - Ouvrages identifiés sur plan d'exploitation : 13 m, dus à la valeur de 10 m fournie par CdF et à l'incertitude du report sur la BD ORTHO® de l'IGN (3 m).

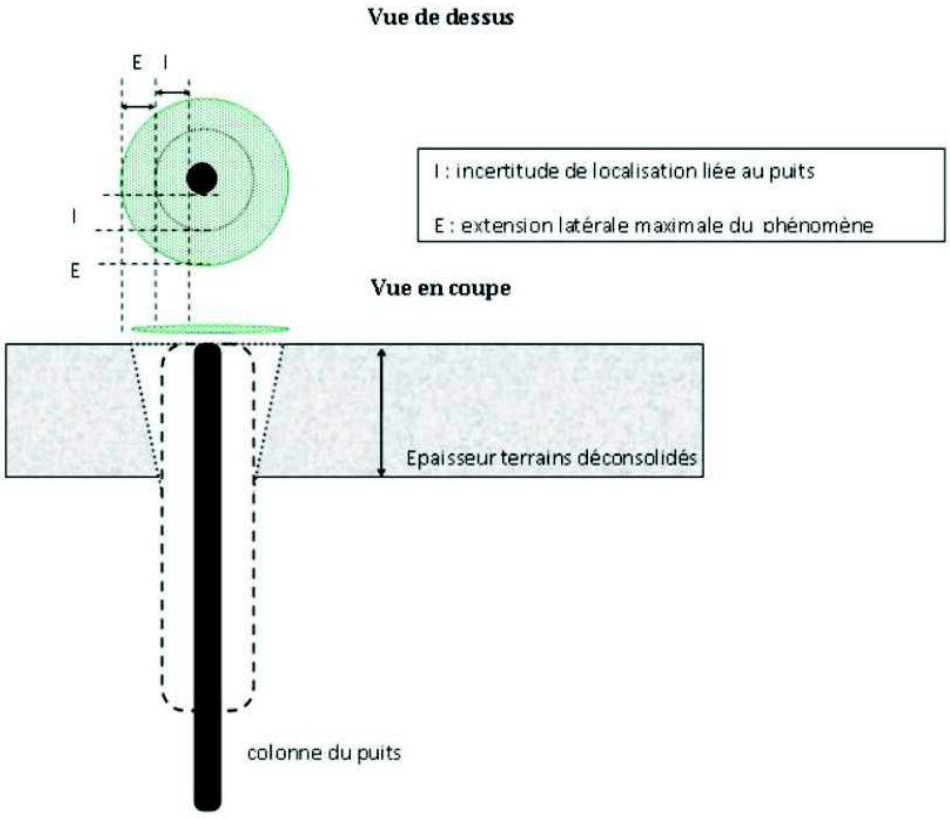


Figure 23 : Zonage de l'aléa effondrement localisé lié aux puits

Pour les galeries, l'extension de la zone d'aléa est définie à partir de la localisation et de l'extension de ces ouvrages. La marge retenue pour cartographier l'aléa se décompose comme suit (cf. figure 24) :

- une marge d'incertitude globale de localisation des galeries et de celle du fond BD ORTHO®. La valeur de cette marge est prise à 8 m, pour les entrées de galeries visibles par CdF (mêmes arguments que pour les puits + report sur BD ORTHO® IGN), et de 13 m pour les entrées non visibles par CdF (mêmes arguments que pour les puits + report sur BDORTHO® IGN) ;
- une marge d'influence correspondant à l'extension latérale maximale d'un fontis en surface prise égale à l'épaisseur des terrains très peu cohésifs de surface et d'un angle de talus de 45°. Comme pour les puits, la valeur de cette marge dans le cas présent est prise à 3 m.

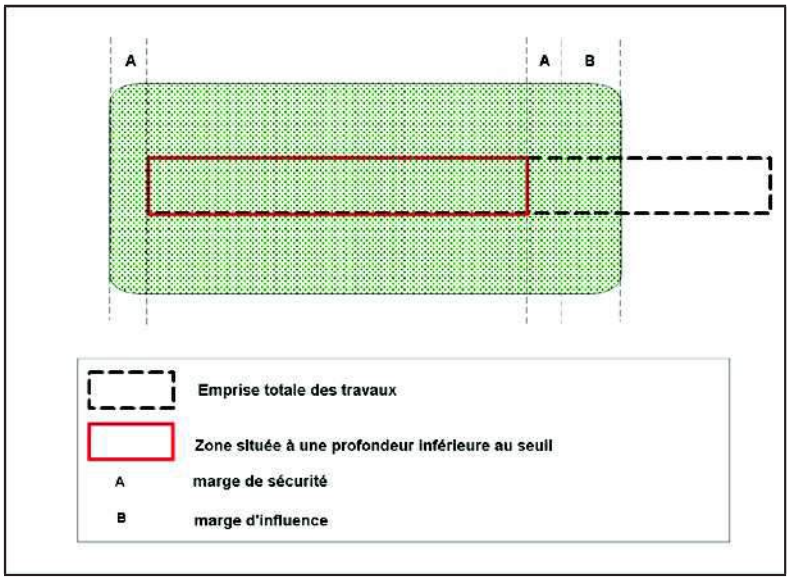


Figure 24 : Zonage de l'aléa effondrement localisé lié à la présence d'une galerie ou d'une descenderie souterraine (vue en plan)

Pour les descenderies, l'aléa de 2009 a été tracé selon un rayon de 25 à 45 m qui tient compte de l'incertitude de positionnement de l'ouvrage (10 m) et de la marge d'extension latérale du phénomène mais surtout de la projection horizontale du tronçon de la descenderie inférieur à 20 m de profondeur (soit 20 à 35 m en considérant les variations d'inclinaison de 30° (cas des descenderies en couche) à 45° (cas des descenderies en travers-banc).

Ce rayon forfaitaire prenait son origine sur le doute quant à la direction des premiers mètres des descenderies. La lecture des plans sources disponibles et l'interprétation géologique du gisement et de son recouvrement tendent à confirmer que l'essentiel des descenderies ont été creusées en travers-bancs dont l'inclinaison serait voisine de 45°. Cette technique permettait d'assurer une meilleure stabilité des premiers mètres des descenderies creusées dans le toit calcaire résistant. Il a par ailleurs été constaté que la direction de la flèche matérialisant l'axe des descenderies sur les cartes des DADT de CdF correspondait le plus souvent à la direction de la portion de la descenderie en couche et non de celle de ces premiers mètres.

En considérant ces éléments et en ayant qu'un échantillon restreint des tracés des descenderies sur les plans (la plupart des axes et orientations des anciennes descenderies aux affleurements ne figurent pas clairement sur les plans sources), l'extension de la zone d'aléa est définie à partir de la localisation de la descenderie et est cartographiée sous la forme d'un cercle dont le rayon correspond à la marge retenue. Celle-ci se décompose comme suit :

- une marge d'incertitude globale de localisation de la descenderie et de celle du fond BD ORTHO®. La valeur de cette marge est prise à 8 m, pour les entrées de descenderies « levées » par CdF (mêmes arguments que pour les puits + report sur BD ORTHO® IGN), et de 13 m pour les entrées « non levées » par CdF (mêmes arguments que pour les puits + report sur BDORTHO® IGN) ;
- un rayon forfaitaire de 15 m qui tient compte de la marge d'extension latérale du phénomène mais surtout de la projection horizontale du tronçon de la descenderie évalué comme potentiellement instable à savoir les 10 premiers mètres (en considérant néanmoins une inclinaison défavorable et sécuritaire pour toutes les descenderies de 30°).

Pour les travaux souterrains, l'extension de la zone d'aléa est définie selon l'emprise des travaux d'exploitations situés à moins de 50 m de profondeur. Les emprises tiennent compte de la marge d'incertitude de localisation des travaux d'exploitation concernés prises à 10 m (cf. § 7.2.2). La marge d'influence, correspondant à l'extension latérale maximale d'un effondrement localisé en surface prise égale à l'épaisseur des terrains très peu cohésifs de surface, est ajoutée pour le tracé de l'aléa. La valeur de cette marge a été estimée à 3 m.

Pour les travaux « mal localisés »

Il s'agit des secteurs au voisinage proche des affleurements et pour lesquels la présence de travaux miniers à moins de 50 m de profondeur est suspectée. L'emprise de ces travaux suspectés est tracée à partir des affleurements et tient compte des éléments de pendage des couches. Une marge d'incertitude de 20 m lié à celle de la position de la ligne d'affleurement est ajoutée. Aucune marge d'influence n'est ajoutée considérant le zonage défini comme globalisant.

13.2 Cartographie de l'aléa affaissement

L'extension des zones d'aléa affaissement qu'il soit à caractère cassant ou souple est définie selon l'emprise des travaux d'exploitations jugés instables. Les emprises tiennent compte de la marge d'incertitude de localisation des travaux d'exploitation concernés prises à 10 m (cf. § 7.2.2).

A ceci s'ajoute une marge d'influence qui varie selon le pendage de la couche exploitée, du caractère souple ou cassant de l'affaissement. Cette marge d'influence, qui permet de cartographier les limites en surface de la zone possiblement influencée par un affaissement, est déterminée à partir d'un angle dit « angle d'influence », pris sur la verticale, qui relie l'extrémité du panneau, au fond, aux points de surface où les affaissements, déformations ou pentes sont considérés comme imperceptibles ou nuls.

Les exploitations en couche pentée se caractérisent par une dissymétrie de la cuvette d'affaissement plus ou moins importante en fonction du pendage. L'existence d'un pendage influe, en effet, directement sur les valeurs des angles d'influence en amont et en aval (cf. figure 25). Considérant, dans une couche située en plateure (pendage subhorizontal), un angle d'influence (γ) constant en gisement penté (pendage supérieur à 20°), on est conduit à distinguer les angles limites qui varient en fonction du pendage (cf. figure 26) :

- l'angle limite « amont », plus petit que l'angle γ ;
- l'angle limite « aval », toujours plus grand que γ.

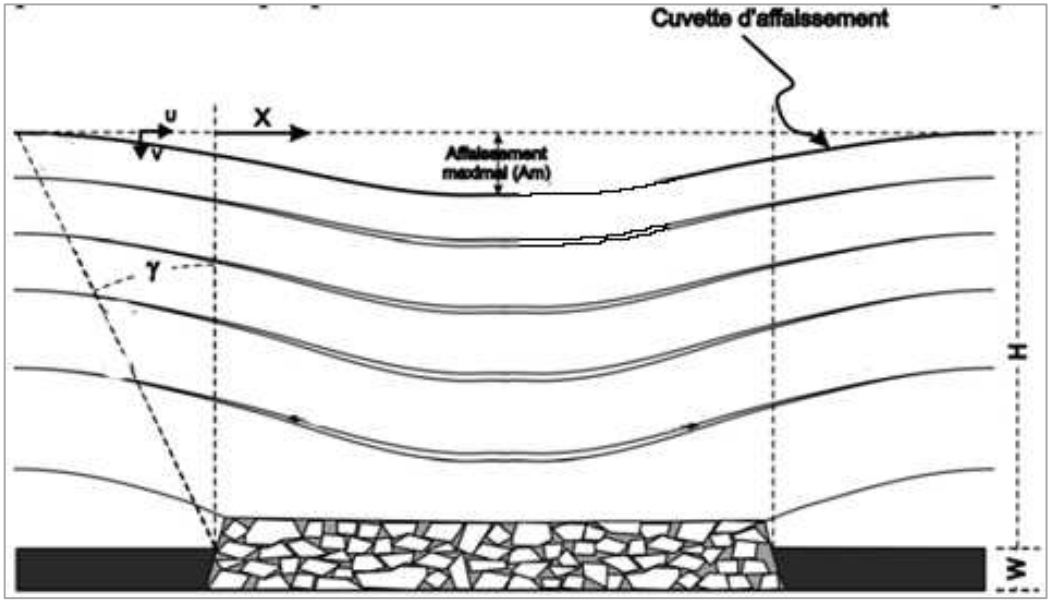


Figure 25 : Représentation schématique d'une cuvette d'affaissement
en gisement en plateure

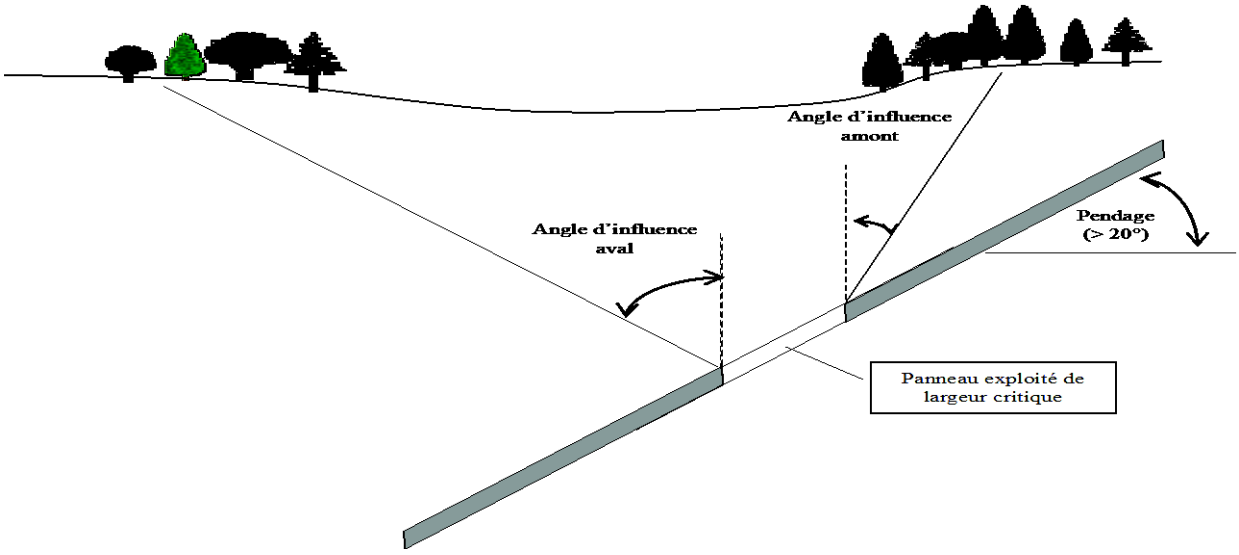


Figure 26 : Schéma montrant la dissymétrie des angles d'influence amont et aval en gisement penté

Dans le cas du bassin de Provence, le gisement en place présente un pendage vers l'ouest de l'ordre de 5° et est ainsi considéré comme en plateure. Les écailles exploitées telles que le Lambeau Charrié présentent quant à elles un pendage plus important (cf. tableau 9). Quand la profondeur d'exploitation devient importante, l'influence de l'angle aval se traduit généralement par une large extension de la cuvette d'affaissement mais, en contrepartie, par des amplitudes d'affaissement vertical et des déplacements différentiels horizontaux plus faibles.

Marge d'influence de l'aléa affaissement à caractère cassant

L'angle d'influence du phénomène d'affaissement à caractère cassant pris à 10° lors de l'étude préliminaire est maintenu. En effet, il est justifié par la physique du phénomène et le retour d'expérience sur des évènements de cette nature, mettant en évidence que la rupture est généralement subverticale à l'aplomb des bords de la zone éboulée au fond. Il tient également compte du rôle majeur que peuvent jouer certaines failles dans l'initiation de ce type d'instabilité. Cela représente, pour les zones concernées par cette étude, une marge variant 15 à 40 m selon leur profondeur.

Néanmoins, un aléa affaissement souple (d'un angle d'influence de 20°) a été considéré en pourtour de ces zones d'affaissement à caractère cassant car il n'est pas exclu que le phénomène redouté revête un caractère souple.

Marge d'influence de l'aléa affaissement à caractère souple

L'angle d'influence du phénomène d'affaissement à caractère souple dépend directement de la nature géologique des terrains présents à l'affleurement. En effet, le retour d'expérience disponible sur les exploitations profondes menées par longues tailles foudroyées met en évidence que les terrains marneux bégudiens, du fait de leur comportement plus souple et déformable, induisent une valeur d'angle d'influence de 35°.

Pour ce qui concerne les zones où le Fuvélien est à l'affleurement (et constitue de fait le seul étage géologique du recouvrement), le comportement beaucoup plus raide et cassant des calcaires pousse à prendre une valeur d'angle d'influence sensiblement plus faible, à savoir, pour le gisement en place considéré en plateure, 20° environ. Cette valeur est celle classiquement mise en évidence dans les bassins miniers avec recouvrement raide (ex : bassin ferrifère lorrain). Pour les écailles exploitées, les valeurs d'angles amont et aval varient selon le pendage et ont été évaluées par secteurs à partir d'abaques existants sur d'autres bassins similaires (ex : bassins houillers du Nord et du Pas-de-Calais (cf. [5]), de Lorraine ou de la Sarre). Le tableau suivant renseigne les angles d'influence pris par secteurs exploités.

Secteur	Pendage	Angle amont	Angle aval
Lambeau Charrié	20°SE	20°	30°
Baume de Marron	15°SW	20°	25°
La Bouilladisse	15°S	20°	25°
La Bouilladisse (Quartier des puits des Boyers et du Pradel)	35°S	15°	35°
Pinchinier	25°SW	20°	30°
Trets	10°NE	20°	25°

Tableau 9 : Angles d'influence des aléas affaissement à caractère souple des secteurs pentés

13.3 Cartographie de l'aléa glissement

L'ensemble des dépôts recensés sont concernés par ce phénomène. La cartographie de l'aléa glissement concerne la base des dépôts. En effet, il est considéré que les glissements auraient potentiellement un impact en pied de terrils dont la marge a été prise à 15, 20 ou 25 m selon la hauteur du dépôt.

13.4 Cartographie de l'aléa tassement

Les zones de dépôts recensées lors de la phase informative sont concernées par ce phénomène. La cartographie de l'aléa tassement concerne les emprises exactes des dépôts définies lors de la phase informative. Aucune marge n'a été ajoutée puisque le phénomène se développe au droit exact des dépôts.

13.5 Cartographie de l'aléa échauffement

L'aléa échauffement concerne certains dépôts du bassin. Dans ce cas, le tracé de l'aléa échauffement est défini selon l'emprise exacte de ces dépôts. Aucune marge n'a été ajoutée puisque le phénomène se développe au droit exact des dépôts.

L'aléa échauffement concerne également les affleurements où la présence de travaux miniers est avérée ou supposée (cf. § 11). Dans ce cas, le tracé de l'aléa échauffement est défini le long des lignes de ces affleurements. Une marge d'incertitude de 20 m lié à celle de la position de la ligne d'affleurement est ajoutée.

13.6 Cartographie de l'aléa inondation

Le tracé de l'aléa inondation résulte d'une évaluation des paramètres (données relatives aux réseaux, aux crues des bassins versants plus ou moins urbanisés, à la topographie, etc.). En effet, les plans à disposition ne sont pas suffisamment précis pour tracer rigoureusement les zones d'aléas et l'interprétation de la morphologie du terrain a été effectuée visuellement, à défaut de données plus précises. Les lames et les volumes en jeu sont également issus d'une évaluation. De manière générale, une réglementation adaptée au degré de précision du travail demandé semblerait appropriée.

14 CONCLUSIONS

La présente étude détaillée fait suite à l'étude préliminaire réalisée en 2009 sur la base des données issues des dossiers de CdF. Elle a permis de rassembler et synthétiser une grande quantité d'informations, jusque-là dispersées, concernant les travaux miniers et leurs conséquences sur le territoire des communes affectées par les anciennes concessions détenues par CdF dans le bassin de lignite de Provence. La surface concernée par l'étude est vaste (environ 30 000 ha) et l'édifice minier majeur : environ 955 ouvrages débouchant au jour reconnus, 130 millions de tonnes exploitées, travaux menés sur 4 couches de l'affleurement jusqu'à plus de 1000 mètres de profondeur (puits Yvon Morandat 1100 m de profondeur, diamètre 10 m).

Ce volume de données géoréférencées a été rassemblé sur des cartes informatives réalisées par commune (15 communes au total sur les 19 concernées par les titres et/ou travaux miniers) et reporté sur fond BD Ortho® de l'IGN (prise de vue aérienne de 2011). Ces cartes à l'échelle du 1/10 000ème présentent les travaux par veine exploitée, l'ossature minière, les ouvrages de surface, terrils et désordres ainsi que les données relatives au gaz, à l'eau et à l'environnement.

Ces informations ont été analysées et les aléas résiduels ont été évalués. Cinq phénomènes de « mouvements de terrain », deux phénomènes d'« inondation » et le phénomène d'échauffement ont été retenus, à savoir :

- les affaissements à caractère « souple » et « cassant », l'effondrement localisé, le glissement et le tassement ;
- la modification du régime des émergences et l'inondation « brutale » ;
- l'échauffement.

En fonction des types de phénomènes, les niveaux évalués varient de faible à fort. Le tableau 10 suivant synthétise les caractéristiques des aléas retenus.

Par ailleurs, compte tenu des mesures effectuées sur les gaz, l'aléa « gaz de mine » serait à envisager. **Faute de méthodologie, ces aléas n'ont pas été évalués dans le cadre de cette étude. La réalisation dans un premier temps d'une ou plusieurs campagnes de mesures est néanmoins recommandée**.

De même, la cartographie des aléas pollutions des sols ou des eaux n'a pas été réalisée, en l'absence de méthodologie validée. L'inventaire des dépôts a néanmoins été intégré dans la hiérarchisation nationale réalisée dans le cadre de la Directive sur les Déchets de l'Industrie Extractive (DDIE, cf. [12]). **On peut avancer que compte tenu de la substance exploitée, les impacts environnementaux ne sont pas majeurs. D'une part, des contrôles réguliers sur les eaux de pompage avant rejet en mer ainsi que sur le milieu marin récepteur sont réalisés. D'autre part, l'étude réalisée dans le cadre de la DDIE conclue que les matériaux constituant les dépôts ne sont pas considérés comme préoccupants d'un point vue environnemental.**

Le rendu cartographique des aléas a été réalisé par commune, à l'échelle du 1/10 000 et sous fond BD Ortho® de l'IGN (prise de vue aérienne de 2011). Sur les 15 communes du bassin, 14 communes sont concernées par le zonage des aléas. Seule la commune d'Allauch ne présente pas d'aléa en l'absence d'une part d'éléments de surface (ouvrages débouchant au jour ou dépôts) et d'autre part de possibilité de phénomènes de mouvements de terrain liés à des exploitations souterraines, ces dernières étant de faible extension et profondes (au-delà de 500 m).

Type de phénomène	Phénomène	Mécanisme	Configuration	Niveau prédisposition	Niveau d'intensité	Niveau d'aléa	Modalités de la cartographie or incertitude fond cartographique (ici 3 m pour BD Ortho® IGN)
Mouvements de terrain	Affaissement	A caractère « cassant »	- Profondeur inférieur à 300 m et - Exploitation par chambres et piliers et - Toit non faillé à l'échelle du panneau et - Pas d'exploitation d'une couche sus-jacente couvrant l'ensemble du panneau et - Largeur L du panneau supérieure à 0,7 fois la profondeur H, soit L > 0,7H et - Taux de défruitement supérieur à 50%	Peu sensible	Elevée	Moyen	Projection verticale des travaux avec un angle d'influence de 10° Incertitude position des exploitations 10 m
		A caractère « souple »	- Largeur L du panneau supérieure à 0,4 fois la profondeur H et - Taux de défruitement supérieur à 20% et - Pente de cuvette supérieure à 0,2%	Peu sensible	Très limitée (0,2% < Pm < 0,8%)	Faible à intensité très limitée	Projection verticale des travaux avec un angle d'influence de 35° si Begudien affleurant et 20° si Fuvélien affleurant Incertitude position des exploitations 10 m
					Limitée 0,8% < Pm < 3%	Faible	
					Modérée 3% < Pm < 6%	Faible	
					Elevée Pm > 6%	Moyen	
	Effondrement localisé	Fontis	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur ou galeries inférieures à 20 m de profondeur	Peu sensible	Modérée (3m < Ø < 10m)	Faible	Emprise travaux avérés ou suspectés + extension latérale de 3 m + Incertitude 10 m pour les travaux avérés et 20 m pour les travaux suspectés
		Débourrage ou rupture tête de puits	Puits remblayés ou dallés dont le rayon inférieur à 2 m	Peu sensible		Faible	Rayon du puits + extension latérale de 3 m + Incertitude de positionnement des puits « levés » (5 m) ou « non levés » (10m)
			Puits non traités et ouverts dont le rayon est inférieur à 2 m ou remblayés ou dallés et d'un rayon supérieur à 2 m	Sensible		Moyen	
		Débourrage ou rupture tête de descenderie	Descenderies traitées	Peu sensible		Faible	Rayon forfaitaire 15 m autour de l'entrée Incertitude de positionnement des descenderies « levées » (5 m) ou « non levées » (10m)
			Descenderies non traitées	Sensible		Moyen	
	Glissement	Glissements superficiels	Ensemble des dépôts sauf carreau Meyreuil, Près Neufs	Peu sensible à sensible	Très limitée à limitée	Faible	Talus et marge en pieds de 15 à 25 m suivant terrils
	Tassement		Tous dépôts	Peu sensible	Limitée	Faible	Emprise dépôt
Inondation	Modification régime émergences	Suite à obturation galerie de la Mer	Emergences par puits Z, galeries Saint-Pierre/Saint-Baudille, Gardanne Biver et Fuveau	Très peu sensible	Limitée (20 cm) à Modérée (50 cm)	Faible	Cartographie photogrammétrique et visuelle de terrain
	Inondation « brutale »	Suite à forte précipitation et embâcle	Afflux d'eaux au niveau des dépôts de Grappon, Défens, Sauvaires et Madame d'Andrée	Peu sensible à très sensible	Limitée à très élevée	Faible / Moyen / Fort	
Echauffement	Incendie		Dépôts en cours de combustion (Sauvaires et Défens)	Non qualifiée	Non qualifiée	Moyen	Emprise dépôt ou ligne d'affleurement (incertitude 20 m)
			Dépôts ayant probablement brulé	Non qualifiée	Non qualifiée	Faible	
			Affleurements avec présence avérée ou suspectée de travaux	Non qualifiée	Non qualifiée	Faible	

Tableau 10 : Caractéristiques des aléas retenus sur le Bassin de Provence

Communes	Type d'aléa	Configuration	Niveau d'aléa				Cartes informatives annexe 1	Cartes d'aléas annexe 2
Allauch	Aucun aléa						A1, A2 et A3	Sans objet
Belcodène	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, A2 et B	D1, D2, D3 et D5
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			
	Affaissement	Caractère « cassant »		Sans objet	Moyen			
		Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Sans objet			
	Glissement	Sur dépôts	Sans objet	Faible				
	Tassement	Sur dépôts		Faible				
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				
Bouc-Bel-Air	Aucun aléa						A1, B et C	Sans objet
Cadolive	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, A2, A3, A4, B et C	D1, D2, D3 et D5
		Têtes de puits		Sans objet	Moyen			
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			
	Affaissement	Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Moyen			
	Glissement	Sur dépôts	Sans objet	Faible	Sans objet			
	Tassement	Sur dépôts		Faible				
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				
Fuveau	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, A2, B et C	D1, D2, D3, D5 et D6
		Galeries à moins de 20 m de profondeur		Faible				
		Têtes de puits		Faible				
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			
	Affaissement	Caractère « cassant »		Sans objet	Moyen			
		Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Sans objet			
	Glissement	Sur dépôts	Sans objet	Faible				
	Tassement	Sur dépôts		Faible				
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				
	Inondation	Sur terrils		Faible	Moyen	Fort		
		Sorties galeries		Faible	Sans objet	Sans objet		
Gardanne	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, A2, A3, A4, B et C	D1, D2, D3, D5 et D6
		Galeries à moins de 20 m de profondeur		Faible	Moyen			
		Têtes de puits		Faible	Moyen			
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			

Communes	Type d'aléa	Configuration	Niveau d'aléa				Cartes informatives annexe 1	Cartes d'aléas annexe 2
Gardanne (suite)	Affaissement	Caractère « cassant »	Sans objet	Sans objet	Moyen	Sans objet	A1, A2, A3, A4, B et C	D1, D2, D3, D5 et D6
		Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Moyen			
	Glissement	Sur dépôts	Sans objet	Faible	Sans objet			
	Tassement	Sur dépôts	Sans objet	Faible	Sans objet			
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				
		Sur terril		Sans objet	Moyen			
	Inondation	Sur terrils		Faible	Moyen	Fort		
		Sorties galeries		Faible	Sans objet	Sans objet		
Gréasque	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, A2, A3, B et C	D1, D2, D3, D5 et D6
		Galeries à moins de 20 m de profondeur		Faible				
		Têtes de puits		Faible	Moyen			
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			
	Affaissement	Caractère « cassant »		Sans objet	Moyen			
		Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Sans objet			
	Glissement	Sur dépôts	Sans objet	Faible				
	Tassement	Sur dépôts		Faible				
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				
		Sur terril		Sans objet	Moyen			
	Inondation	Sur terrils		Faible	Moyen	Fort		
La Bouilladisse	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, B et C	D1, D2, D3 et D5
		Galeries à moins de 20 m de profondeur		Faible	Moyen			
		Têtes de puits		Faible	Sans objet			
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			
	Affaissement	Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Moyen			
	Glissement	Sur dépôts	Sans objet	Faible	Sans objet			
	Tassement	Sur dépôts		Faible				
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				
		Sur terril		Sans objet	Moyen			
La Destrousse	Aucun aléa						Sans objet	Sans objet
Marseille	Effondrement localisé	Galeries à moins de 20 m de profondeur	Sans objet	Sans objet	Moyen	Sans objet	B et C	D1
		Têtes de puits			Moyen			
Meyreuil	Glissement	Sur dépôts	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, B et C	D3, D5 et D6
	Tassement	Sur dépôts		Faible				
	Echauffement	Sur terril		Sans objet	Moyen			

Communes	Type d'aléa	Configuration	Niveau d'aléa				Cartes informatives annexe 1	Cartes d'aléas annexe 2
Mimet	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, A2, A3, A4, B et C	D1, D2, D3 et D5
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			
	Affaissement	Caractère « cassant »		Sans objet	Moyen			
		Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Moyen			
	Glissement	Sur dépôt	Sans objet	Faible	Sans objet			
	Tassement	Sur dépôt		Faible				
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				
		Sur terril		Sans objet	Moyen			
Peynier	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1 et B	D1, D3 et D5
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			
	Glissement	Sur dépôt		Faible	Sans objet			
	Tassement	Sur dépôt		Faible				
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				
Peypin	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, A2, A3, A4, B et C	D1, D2, D3 et D5
		Têtes de puits		Faible				
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			
	Affaissement	Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Moyen			
	Glissement	Sur dépôt	Sans objet	Faible	Sans objet			
	Tassement	Sur dépôt		Faible				
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				
Rousset	Aucun aléa						Sans objet	Sans objet
Simiane-Collongue	Affaissement	Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Sans objet	Sans objet	A1 et A4	D2 et D3
	Glissement	Sur dépôt	Sans objet	Faible				
	Tassement	Sur dépôt		Faible				
Saint-Savournin	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, A2, A3, A4, B et C	D1, D2, D3 et D5
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			
	Affaissement	Caractère « cassant »		Sans objet	Moyen			
		Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Sans objet			
	Glissement	Sur dépôt	Sans objet	Faible				
	Tassement	Sur dépôt		Faible				
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				
Septème-les-Vallons	Aucun aléa						C	Sans objet

Communes	Type d'aléa	Configuration	Niveau d'aléa				Cartes informatives annexe 1	Cartes d'aléas annexe 2
Trets	Effondrement localisé	Travaux avérés ou suspectés à moins de 50 m de profondeur	Sans objet	Faible	Sans objet	Sans objet	A1, B et C	D1, D2, D3 et D5
		Têtes de puits		Faible				
		Têtes de descenderies		Faible	Moyen			
	Affaissement	Caractère « souple »	Faible à intensité très limitée	Faible	Sans objet			
	Glissement	Sur dépôt	Sans objet	Faible				
	Tassement	Sur dépôt		Faible				
	Echauffement	Sur affleurements		Faible				

Tableau 11 : Répartition des aléas « mouvements de terrain » par commune

Bibliographie

[1] Bassin de lignite de Provence – Anciennes concessions détenues par les Charbonnages de France – Définition et cartographie préliminaire de l'aléa, juin 2009. Rapport GEODERIS S2009/58DE-09PAC2210

[2] Note d'information sur la nature des mouvements de terrains susceptibles de se développer à l'aplomb des anciennes exploitations menées par chambres et piliers dans le bassin houiller de Provence, août 2010. Rapport INERIS DRS-10-116224-09341A.

[3] L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers - Guide Méthodologique - Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa - Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mine. Rapport INERIS DRS-06-51198/R01, mai 2006.

[4] Expertise internationale du dossier d'arrêt définitif des travaux des concessions de Gardanne (13). Rapport Geoderis 03-PACA-5001R03, octobre 2003.

[5] Bassin lignitifère de Provence (Bouches-du-Rhône) - Etude et cartographie détaillées - de l'aléa « affaissement » lié à l'activité minière. Rapport Geoderis S2015/068DE-15PAC36040, septembre 2015

[6] Révision des aléas du secteur de Gardanne - Volet aléa inondation de type « inondation brutale » lié à quatre terrils du Bassin Houiller de Provence - Compléments dans les secteurs du puits Z et des points d'émergence minière secondaires. Rapport Geoderis S2015/075DE-15PAC36040, septembre 2015.

[7] Etude hydrogéologique des travaux miniers de la région de Gardanne (13). Rapport CESAME, 2002.

[8] Bassin houiller de Provence - Arrêt définitif des travaux miniers dans les 12 concessions du bassin de Provence, Volume 3 – Mémoire – La Grande Concession (C3), 2002. Houillères de Bassin du Centre et du Midi – Groupe Charbonnages de France.

[9] Durand, Gaviglio, Gonzalez et Vetter. Gardanne, livret guide excursion 26ème congrès géologique international, Industrie Minérale, juin 1980.

[10] Contribution au développement d'outils d'aide à l'évaluation des aléas dans le cadre des PPRM Aléas « mouvements de terrain » pour les gisements pentés et filoniens – Partie 2 : Typologie des évènements redoutés au droit d'exploitations pentées et/ou filoniennes. Rapport INERIS DRS-05-55102/R02, 2005.

[11] Annexe technique au guide d'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers - Evaluation de l'aléa « effondrement localisé ». Rapport INERIS DRS-09-103953-12226A, décembre 2009.

[12] Inventaire des dépôts miniers issus des exploitations charbonnières. Rapport GEODERIS N2013/042DE_bis-13NAT2440, juin 2014

[13] Suivi qualitatif du rejet en mer des eaux de mine – Campagne été 2014. Rapport COPRAMEX Marché AO 12033S, décembre 2014.

[14] Bassin de lignite de Provence (13) - Etude de risques liés à l'effondrement localisé - Communes de Fuveau, Marseille et La Bouilladisse. Rapport GEODERIS N2016/006DE – 16NAT23060, février 2016.

[15] Bassin lignitifère de Provence – Commune de Saint-Savournin (Bouches-du-Rhône) – Résultat de la révision de l'aléa « mouvements de terrain » au niveau d'un projet de lotissement. Rapport GEODERIS S2015/079DE – 15PAC36070, décembre 2015.